



TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH JUMLAH *LAYER* ALUMINIUM TERHADAP
KETAHANAN KOROSI DAN KETAHANAN AUS PADA
PELAPISAN BAJA API 5L GRADE B MENGGUNAKAN
METODE *WIRE ARC SPRAY***

RANGGA AL GIFARY IMANULLAH
NRP. 2712 100 107

Dosen Pembimbing
Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



FINAL PROJECT - TL141584

**EFFECT OF ALUMINIUM'S LAYER AMOUNT ON
CORROSION RESISTANCE AND WEAR RESISTANCE IN
THE COATING PROCESS OF API 5L GRADE B STEEL
USING WIRE ARC SPRAY METHOD**

RANGGA AL GIFARY IMANULLAH
NRP. 2712 100 107

Advisor

Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Materials and Metallurgical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

**PENGARUH JUMLAH LAYER ALUMINIUM
TERHADAP KETAHANAN KOROSI DAN
KETAHANAN AUS PADA PELAPISAN BAJA API 5L
GRADE B MENGGUNAKAN METODE WIRE ARC
SPRAY**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Korosi Dan Analisa Kegagalan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RANGGA AL GIFARY IMANULLAH

2712100107

Disetujui oleh dosen pembimbing tugas akhir :

1. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.....(Pembimbing I)
2. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.....(Pembimbing II)



(halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH JUMLAH LAYER ALUMINIUM
TERHADAP KETAHANAN KOROSI DAN
KETAHANAN AUS PADA PELAPISAN BAJA API 5L
GRADE B MENGGUNAKAN METODE WIRE ARC
SPRAY**

Nama Mahasiswa : Rangga Al Gifary Imanullah
NRP : 2712 100 107
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing : Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Co-Pembimbing : Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Abstrak

Korosi adalah masalah utama penyebab terjadinya kegagalan pada material terutama pada pipeline yang merupakan peralatan untuk menyalurkan minyak atau gas bumi reservoir. Untuk mencegah atau mengurangi terjadinya korosi dilakukan proteksi atau perlindungan pada pipeline, perlindungan yang paling umum dilakukan adalah melapisi dengan lapisan proteksi atau coating. Penelitian ini menggunakan coating dengan metode wire arc spray dengan variasi jumlah lapisan pada coating sebanyak 6 layer, 8 layer, dan 10 layer. Material coating yang digunakan adalah Aluminium wire 99,8% untuk melapisi substrat baja API 5L Grade B pada lingkungan NaCl 3,5%. Kemudian dilakukan pengukuran ketebalan, pengujian daya lekat, pengujian laju korosi, pengujian EDX, dan pengujian laju keausan terhadap spesimen. Ketebalan yang tertinggi didapat pada variabel 10 layer dengan ketebalan 1323,67 μm , daya lekat tertinggi didapat pada variabel 6 layer dengan nilai 38,82 MPa, ketahanan korosi tertinggi didapat pada jumlah layer 10 dengan nilai 0,019102 mm/year, dan ketahanan aus tertinggi terdapat pada spesimen dengan variabel 6 layer dengan nilai sebesar 5,21 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$. Dalam penelitian ini, didapatkan variabel 6 layer yang paling efektif dan ekonomis untuk diaplikasikan karena memiliki

ketahanan korosi yang cukup untuk mencegah terbentuknya produk korosi dan memiliki ketahanan aus yang tertinggi dengan harga yang lebih murah dibandingkan variabel lainnya.

Kata Kunci : *Coating, Daya Lekat, Laju Aus, Ketahanan Korosi, Ketahanan Aus*

EFFECT OF ALUMINIUM'S LAYER AMOUNT ON CORROSION RESISTANCE AND WEAR RESISTANCE IN THE COATING PROCESS OF API 5L GRADE B STEEL USING WIRE ARC SPRAY METHOD

Student Name : Rangga Al Gifary Imanullah
NRP : 2712 100 107
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Co-Advisor : Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.

Abstract

Corrosion is a major problem the cause of the failure on the material, especially in the pipeline which is the equipment to deliver oil or gas from the reservoir. To prevent or reduce the occurrence of corrosion, some kind of protection is undego in the pipeline, the protection of the most common is to coat with a protective layer or coating. This research is using wire arc spray coating method with amount of coating layer as much as 6 layers, 8 layers and 10 layers as the variations. Coating material used is aluminum wire 99.8% Al for the coating of steel substrates API 5L Grade B in the environment of NaCl 3.5%. Then the measurement of thickness, adhesion testing, the testing of corrosion rate, EDX testing and wear rate testing were performed on specimens. Based on the results, the highest thickness obtained on the variable 10 amount of layer with a thickness of 1323.67 μm , the highest adhesion strength is obtained in the variable 6 amount of layer with a value of 38.82 MPa, the highest corrosion resistance is obtained on the number of layers 10 with a value of 0.019102 mm/year , and wear resistance is highest in the specimen with variable 6 amount of layer with a value of 5.21 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{hour}$. In this research, it can be concluded that 6 layers variable suit the requirement the best because of its corrosion resistance that is sufficient to prevent the

corrosion to occur and it provides the highest wear resistance with lower cost compared to another variables.

Keywords: *Coating, Adhesion Strength, Wear Rate, Corrosion Resistance, Wear Resistance*

DAFTAR ISI

HALAMAN MUKA.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Spesifikasi dan Standar Material untuk Pipa pada <i>Pipeline</i>	5
2.2 Aluminium.....	7
2.3 Korosi.....	8
2.4 Korosi pada Aluminium.....	8
2.5 Paduan Fe-Al.....	11
2.6 Teknologi Pelapisan.....	12

2.7	<i>Thermally Sprayed Coating</i>	13
2.8	Penelitian Sebelumnya	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	21
3.2	Bahan Penelitian.....	21
3.3	Alat Penelitian	22
3.4	Metode Penelitian.....	25
3.5	Pengujian.....	27
3.6	Rancangan Penelitian	28
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisa Data.....	31
4.2	Pembahasan.....	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	58
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN		61
UCAPAN TERIMA KASIH.....		67
BIODATA PENULIS		69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Komposisi Kimia dan Yield Strength API 5L ..	6
Tabel 3. 1	Komposisi Kimia Material API 5L Grade B ...	22
Tabel 3. 2	Parameter Pengujian Tafel.....	28
Tabel 3. 3	Rancangan Pengujian Spesimen	29
Tabel 4. 1	Hasil Uji Ketebalan	32
Tabel 4. 2	Hasil Uji Adhesi.....	35
Tabel 4. 3	Nilai <i>Corrosion Rate</i>	38
Tabel 4. 4	Nilai Laju Aus	39
Tabel 4. 5	Komposisi Unsur pada <i>Coating</i>	49

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram pourbaix untuk Aluminium murni di lingkungan air laut	10
Gambar 2. 2 Skema Thermal Arc Spraying Process	15
Gambar 3. 1 Diagram Alir Percobaan	21
Gambar 3. 2 Alat <i>Wire Arc Spray</i>	22
Gambar 3. 3 <i>DFT Gauge</i>	23
Gambar 3. 4 Alat <i>Sandblast</i>	23
Gambar 3. 5 Alat Uji <i>Pull-Off</i>	24
Gambar 3. 6 Pin-on-disk Tribometer	24
Gambar 3. 7 Alat Polarisasi Potensi dinamik	25
Gambar 3. 8 Scanning Electron Microscope	25
Gambar 4. 1 Pengamatan visual permukaan <i>coating</i>	31
Gambar 4. 2 Hasil pengukuran ketebalan menggunakan SEM pada <i>cross-section</i> perbesaran 50x pada <i>coating</i> 6 layer	32
Gambar 4. 3 Hasil pengukuran ketebalan menggunakan SEM pada <i>cross-section</i> perbesaran 50x pada <i>coating</i> 8 layer	33
Gambar 4. 4 Hasil pengukuran ketebalan menggunakan SEM pada <i>cross-section</i> perbesaran 50x pada <i>coating</i> 10 layer	33
Gambar 4. 5 Tampilan Permukaan Benda Uji Setelah Pengujian Daya Lekat	34
Gambar 4. 6 Benda Uji Tafel	35
Gambar 4. 7 Kurva Polarisasi Spesimen dengan 0 Layer	36
Gambar 4. 8 Kurva Polarisasi Spesimen <i>Coating</i> dengan Variabel 6 Layer	37
Gambar 4. 9 Kurva Polarisasi Spesimen <i>Coating</i> dengan Variabel 8 Layer	37
Gambar 4. 10 Kurva Polarisasi Spesimen <i>Coating</i> dengan	

Variabel 10 <i>Layer</i>	38
Gambar 4. 11 Morfologi <i>Coating</i> pada spesimen dengan variabel 6 layer dengan perbesaran 100x	41
Gambar 4. 12 Morfologi <i>Coating</i> pada spesimen dengan variabel 6 layer di <i>Cross-section</i> dengan perbesaran 50x..	42
Gambar 4. 13 Kenampakan porositas permukaan pada spesimen variabel 6 layer	43
Gambar 4. 14 Morfologi <i>Coating</i> pada spesimen dengan variabel 8 layer dengan perbesaran 100x	43
Gambar 4. 15 Morfologi <i>Coating</i> pada spesimen dengan variabel 8 layer di <i>Cross-section</i> dengan perbesaran 50x..	44
Gambar 4. 16 Kenampakan porositas permukaan pada spesimen variabel 8 layer	45
Gambar 4. 17 Morfologi <i>Coating</i> pada spesimen dengan variabel 10 layer dengan perbesaran 100x	45
Gambar 4. 18 Morfologi <i>Coating</i> pada spesimen dengan variabel 10 layer di <i>Cross-section</i> dengan perbesaran 50x	46
Gambar 4. 19 Kenampakan porositas permukaan pada spesimen variabel 10 layer	47
Gambar 4. 20 Morfologi <i>Coating</i> pada Pengujian EDX.	48
Gambar 4. 21 Persentase Komposisi Unsur pada <i>Coating</i>	48
Gambar 4. 22 Grafik Variabel Jumlah Layer vs Ketebalan	50
Gambar 4. 23 Grafik Variabel Jumlah Layer vs Daya Lekat	51
Gambar 4. 24 Grafik Variabel Jumlah <i>Layer</i> vs. <i>Corrosion Rate</i>	52
Gambar 4. 25 Grafik Variabel Jumlah <i>Layer</i> vs Laju Aus	53
Gambar 4. 26 Grafik Variabel Jumlah <i>Layer</i> Vs. Porositas	

Permukaan	54
Gambar 4. 27 Benda Uji EDX	55

(halaman ini sengaja dikosongkan)



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di industri minyak bumi dan gas alam saat ini, pipa baja karbon adalah jenis pipa yang paling banyak digunakan untuk sistem pipeline. Pipa baja karbon memiliki banyak kelebihan dibanding jenis-jenis pipa yang lain seperti Fiberglass Reinforced Plastic (FRP), Stainless Steel (SS), incoloy, dan lainnya. Kelebihan pipa baja karbon antara lain adalah segi biaya yang relatif tidak terlalu mahal, kemudahan instalasi di lapangan dan sifat mekaniknya yang dapat diandalkan dalam banyak area atau sistem di lapangan. Masalah yang kerap timbul dalam penggunaan pipa baja karbon adalah korosi. (Rafferty, 1989)

Korosi merupakan masalah yang kerap timbul dalam penggunaan pipeline baja karbon. Selama ini, pengendalian terhadap korosi pada pipa baja karbon telah dilakukan melalui berbagai metode. Metode coating membuat permukaan logam menjadi terpisah terhadap lingkungan korosif.

Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem pencegahan korosi untuk menanggulangi hal tersebut. Dalam penelitian ini, digunakan metode pelapisan *thermal spraying* sebagai solusi terhadap korosi yang terjadi. Pelapisan (coating) adalah proses penambahan atau penumpukan suatu material ke suatu permukaan material lain (atau material yang sama). Pada umumnya pelapisan diterapkan ke suatu permukaan dengan tujuan untuk melindungi permukaan dan lingkungan yang mungkin menyebabkan korosi atau deterioratif (merusak), untuk meningkatkan penampilan permukaan, dan untuk memperbaiki permukaan atau bentuk suatu komponen tertentu dan lain-lain. Pelapisan terdiri atas bermacam-macam teknik pelapisan dan pemilihannya didasarkan atas permintaan fungsional, kemampuan adaptasi material pelapis terhadap teknik yang digunakan, serta tingkat adhesi (perekatan) yang diminta. Teknik-teknik ini dibagi menjadi *metallic* dan *non metallic*.



Metallic coating deposition dianggap menjadi tiga kategori, dimana *hard facing* menjadi teknik yang dipentingkan dalam tugas ini. Ada tiga teknik dalam *hard facing* yaitu *cladding*, *welding*, dan *thermal spraying*. *Thermal spraying* merupakan salah satu teknik rekayasa permukaan, yaitu dengan mendepositkan partikulat dalam bentuk cair, semi-cair, atau padat ke substrat atau sekelompok proses dimana material pelapis (*feedstock material*) dipanaskan dan didorong sebagai partikel individu atau *droplets* ke suatu permukaan (*base material/substrat*). (Pawlowski, 2008)

Energi termal yang digunakan untuk melelehkan material pelapis dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu *electrical* dan *flame heating*. Dimana pada penelitian ini, sumber energi termal untuk melakukan *thermal spraying* berasal dari *electrical source*. Penelitian ini menggunakan metode *wire arc spray*. Proses *wire arc spray* pertama-tama yaitu material awalnya dipanaskan hingga keadaan material menjadi plastis atau meleleh serta diberi percepatan oleh aliran gas bertekanan ke substrat. Partikel-partikel tersebut menabrak substrat, menempel, dan membentuk lapisan tipis (*splats*) yang menyesuaikan dan menempel pada permukaan tidak rata pada substrat dan dengan partikel pelapis yang lain. Kemudian setelah dingin terbentuk lapisan yang tidak homogen dan umumnya terdapat derajat porositas dan oksida logam. Pengikat antara substrat dan pelapis dapat berupa ikatan mekanik, kimia, metalurgi atau kombinasi ketiganya. Sifat-sifat pelapis bergantung pada jenis material, proses *thermal spray* dan parameter-parameter yang diterapkan, dan perlakuan setelah proses *thermal spray* pada pelapis. (Schoop dan Guenther, 1917)

Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan dan menganalisa pengaruh variasi *multilayer* terhadap nilai kekuatan bonding, ketahanan abrasi, dan ketahanan korosi pada baja API 5L Grade B di lingkungan air laut.



1.2 Perumusan Masalah

Dengan uraian pada latar belakang, maka didapatkan permasalahan yang dicari, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh jumlah lapisan *coating* aluminium dengan metode *Thermally Sprayed Aluminium* pada baja API 5L Grade B terhadap ketebalan lapisan *coating*?
2. Bagaimana pengaruh jumlah lapisan *coating* aluminium dengan metode *Thermally Sprayed Aluminium* pada baja API 5L Grade B terhadap daya lekat *coating*?
3. Bagaimana pengaruh jumlah lapisan *coating* aluminium dengan metode *Thermally Sprayed Aluminium* pada baja API 5L Grade B terhadap ketahanan korosi?
4. Bagaimana pengaruh jumlah lapisan *coating* aluminium dengan metode *Thermally Sprayed Aluminium* pada baja API 5L Grade B terhadap ketahanan aus?
5. Manakah variabel yang paling efektif untuk diaplikasikan di dunia industri?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian dan pembahasan menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Pengaruh lingkungan sekitar diabaikan.
2. Feed pressure dianggap konstan.
3. Jarak *nozzle* dianggap sama.
4. Sudut *nozzle* dianggap sama.
5. Spesimen uji dianggap homogen dan tanpa cacat.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :



1. Menganalisa pengaruh variasi jumlah lapisan *coating* (*multi-layer*) terhadap ketebalan lapisan *coating* pada baja API 5L Grade B.
2. Menganalisa pengaruh variasi jumlah lapisan *coating* (*multi-layer*) terhadap daya lekat *coating* pada baja API 5L Grade B.
3. Menganalisa pengaruh variasi jumlah lapisan *coating* (*multi-layer*) terhadap ketahanan korosi pada baja API 5L Grade B.
4. Menganalisa pengaruh variasi jumlah lapisan *coating* (*multi-layer*) terhadap ketahanan aus baja API 5L Grade B.
5. Menganalisa dan menentukan variabel yang paling efektif untuk diaplikasikan di dunia industri.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai rekomendasi kepada pihak terkait dalam penanganan material baja API 5L Grade B pada aplikasi pipa di lingkungan air laut yang bersifat korosif serta sebagai inspirasi dan referensi bagi peneliti lain untuk mengembangkan penelitian ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Spesifikasi dan Standar Material untuk Pipa pada Pipeline

Variasi pipa yang digunakan untuk *pipeline oil and gas service* antara lain adalah baja karbon (*carbon steel*), *stainless steel* dan *incoloy*. Beberapa spesifikasi dan standar material untuk pipa sudah ditentukan oleh beberapa badan standar internasional seperti *American Society for Testing and Materials* (ASTM) dan *American Petroleum Institute* (API). Kedua lembaga tersebut berperan sebagai penyedia standar spesifikasi material tertentu. Meskipun ASTM dan API sama-sama sebagai lembaga penyedia standar, API hanya mengeluarkan standar yang bergerak di bidang perminyakan. API adalah sebuah asosiasi *trade*, sehingga lembaga tersebut juga menyediakan produk dan melakukan perkembangan terhadap produk-produk mereka yang dijual ke pasar. ASTM hanya berperan sebagai penyedia standar material serta metode pengujian untuk aplikasi bidang industri secara luas. Selain itu, ada pula *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), berperan sebagai asosiasi yang menentukan standar desain dan konstruksi sistem perpipaan.

Specification for Line Pipe: API 5L adalah standar untuk spesifikasi *pipeline* yang memuat tentang mekanisme material *pipeline*. API 5L merupakan standar yang digunakan untuk aplikasi *oil and gas*. Material dalam API 5L dibagi menjadi beberapa *grade*, yakni A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 dan X80. **Tabel 2.1** menjelaskan komposisi kimia tiap *grade* untuk API 5L. Perbedaan tiap *grade* adalah pada komposisi kimia serta penomoran angka setiap *grade* menunjukkan kekuatan tariknya (nilai *yield strength*, contoh $X42=42MPa$).



Tabel 2. 1 Komposisi Kimia dan Yield Strength API 5L
(Institute, 2005)

	<i>Carbon Max. (%)</i>	<i>Manganese Max. (%)</i>	<i>Phosphorus Max. (%)</i>	<i>Sulfur Max (%)</i>	<i>Titanium Max. (%)</i>
<i>Seamless</i>					
<i>B</i>	0.24	1.20	0.025	0.015	0.04
<i>X42</i>	0.24	1.30	0.025	0.015	0.04
<i>X46, X52, X56, X60</i>	0.24	1.40	0.025	0.015	0.04
<i>X65, X70, X80</i>	0.24	1.40	0.025	0.015	0.06
<i>Welded</i>					
<i>B</i>	0.22	1.20	0.025	0.015	0.04
<i>X42</i>	0.22	1.30	0.025	0.015	0.04
<i>X46, X52, X56</i>	0.22	1.40	0.025	0.015	0.04
<i>X60</i>	0.22	1.40	0.025	0.015	0.04
<i>X65</i>	0.22	1.45	0.025	0.015	0.06
<i>X70</i>	0.22	1.65	0.025	0.015	0.06
<i>X80</i>	0.22	1.85	0.025	0.015	0.06

1	2	3	4	5				
Grade	Yield Strength, Min.		Yield Strength, Max.		UTS, Min.		UTS, Max.	
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
B	35000	241	65000	448	60000	414	110000	758
X42	42000	290	72000	496	60000	414	110000	758
X46	46000	317	76000	524	63000	434	110000	758
X52	52000	359	77000	531	66000	455	110000	758
X56	56000	386	79000	544	71000	490	110000	758
X60	60000	414	82000	565	75000	517	110000	758
X65	65000	448	87000	600	77000	531	110000	758
X70	70000	483	90000	621	82000	565	110000	758
X80	80000	552	100000	690	90000	621	120000	827



2.2 Aluminium

Aluminium atau aluminum, adalah suatu unsur kimia dalam kelompok boron dengan simbol Al dan nomor atom 13. Aluminium bersifat non-magnetik, ulet, lunak, dan berwarna putih keperakan,. Aluminium adalah unsur yang paling melimpah ketiga di kerak bumi (setelah oksigen dan silikon) dan merupakan logam yang paling melimpah. Aluminium mengisi sekitar 8% massa kerak bumi, tetapi aluminium tidak melimpah di mantel bawahnya. Aluminium begitu reaktif secara kimiawi, sehingga spesimen aluminium dalam bentuk murni asli sangat jarang dan terbatas akibat lingkungan reduksi ekstrem. Tetapi, aluminium dapat ditemukan dalam bentuk kombinasi atau senyawa di lebih dari 270 mineral yang berbeda. (Shakhashiri, 2008)

Aluminium memiliki sifat yang lunak dan lebih tahan korosi jika dibandingkan dengan logam lain yang biasanya juga digunakan sebagai logam pelindung (Zn dan Mg). Selain itu, aluminium juga ringan, ulet, dan mudah ditempa. Aluminium bersifat non-magnetik dan tidak mudah terbakar. Sebuah film aluminium dapat berfungsi sebagai reflektor yang baik (sekitar 92%) pada cahaya tampak dan reflektor yang sangat baik (sebanyak 98%) pada radiasi inframerah sedang dan jauh. Kekuatan *yield* aluminium murni berkisar antara 7-11 MPa, sedangkan aluminium paduan memiliki kekuatan *yield* mulai 200 Mpa sampai 600 MPa. (Polmear, 1995)

Aluminium memiliki sekitar sepertiga kepadatan dan kekakuan baja. Hal ini memudahkan aluminium *dimachining*, dicor, ditarik dan diekstrusi. Atom aluminium tersusun dalam struktur *face-centered cubic* (fcc). Aluminium memiliki energi *stacking-fault* sekitar 200 mJ/m². (Dieter, 1988)

Aluminium merupakan konduktor panas dan listrik yang baik, memiliki 59% konduktivitas tembaga, baik panas dan listrik, sementara memiliki hanya 30% kepadatan tembaga. Aluminium dapat menjadi superkonduktor, dengan temperatur



kritis superkonduktor $1,2^{\circ}$ Kelvin dan medan magnet kritis sekitar 100 Gauss. (Cochran dan Mapother, 1958)

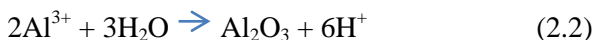
2.3 Korosi

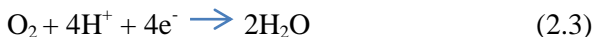
Korosi adalah proses penguraian suatu bahan oleh reaksi kimia, tidak termasuk mekanisme seperti erosi atau aus, yang merupakan mekanisme mekanik. Korosi air adalah penguraian logam di air, di mana air bertindak sebagai elektrolit penghantar ion. Ketika permukaan logam direndam dalam elektrolit, misalnya air, ion logam terlepas dari logam, mengalir ke elektrolit, meninggalkan elektron bebas pada logam. Penguraian ion logam terus berlanjut sampai logam mencapai potensi keseimbangan dan sistem berisi konsentrasi tertentu suatu ion terlarut untuk berada dalam keadaan kesetimbangan. Mengaduk elektrolit, mengganti air, menyebabkan logam kehilangan lebih banyak ion, dan tidak mencapai keseimbangan. Akibatnya, logam terkorosi terus menerus.

2.4 Korosi pada Aluminium

Aluminium dikenal cukup tahan korosi, setidaknya pada pH netral. Ini disebabkan karena kehadiran oksida yang sangat stabil di permukaan aluminium. Penguraian aluminium terjadi menurut persamaan (2.1). Sebuah goresan di oksida yang segera diikuti oleh oksidasi permukaan menurut persamaan (2.2). tidak seperti baja, yang membutuhkan oksigen terlarut dalam larutan untuk membentuk oksida, aluminium oksida terbentuk dengan cara menguraikan molekul air. (Nisancioglu, 1994)

Elektron yg dilepas dikonsumsi oleh reaksi reduksi dalam persamaan (2.3) dan (2.4). Anoda dan katoda dapat terletak di bagian yang sama pada logam; maka tidak ada kebutuhan untuk sebuah elektroda eksternal untuk hadir untuk proses bisa terjadi.





(Nisancioglu, 2007)

Baja yang dilapisi Aluminium memiliki ketahanan oksidasi dan korosi yang baik dan bisa menggantikan *stainless steel* atau *heat-resisting steel* di beberapa kondisi. Baja yang dilapisi aluminium memiliki aplikasi yang luas, karena biaya rendah dan kinerja yang sangat baik, dalam industri petrokimia, tenaga listrik dan sistem konversi energi lainnya, dll dan telah menarik perhatian banyak peneliti. (Tjong, 1986)

Aluminium oksida bersifat amfoter; yang berarti aluminium oksida tidak stabil di lingkungan asam dan basa. Hal ini dapat dilihat pada diagram Pourbaix untuk aluminium murni dalam air laut pada gambar 2.1, dimana potensi ekuilibrium (E^0) antara logam dan berbagai spesies teroksidasi yang diplot sebagai fungsi pH. Persamaan Nernst (2.5) digunakan untuk menyusun diagram Pourbaix.

$$E_e = E^0 - \frac{RT}{zF} \ln \frac{[\text{reduced}]}{[\text{oxidised}]} \quad (2.5)$$

Dimana R adalah konstanta gas universal (8,2145 J / kmol), T adalah suhu mutlak (K), z adalah jumlah mol elektron yang terlibat dalam reaksi dan F adalah konstanta Faraday (96485 C/elektron.mol) . Notasi [reduced] dan [oxidised] adalah produk konsentrasi semua spesies yang muncul di masing-masing sisi yang tereduksi dan sisi teroksidasi reaksi elektroda, dipangkat dengan koefisien stoikiometri mereka.

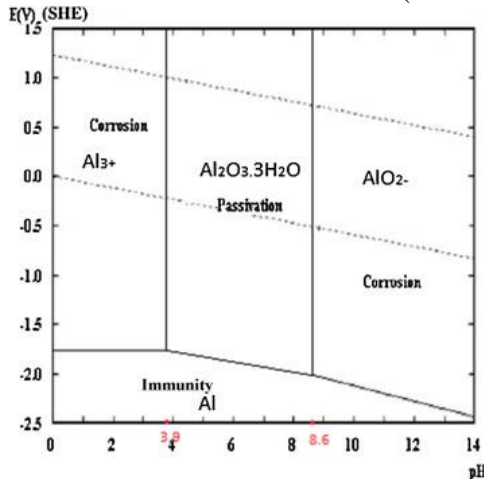
Seperti yang telah disebutkan di atas, reaksi katodik harus dilakukan untuk menyeimbangkan reaksi anodik pelarutan logam. Kesetimbangan potensial reaksi katodik, yang dihitung dengan persamaan Nernst menjadi garis lurus pada diagram Pourbaix. Karena ada dua kemungkinan reaksi katodik dalam air, (2.3) dan (2.4), ada dua garis lurus pada diagram Pourbaix,



menurunnya potensial terjadi seiring dengan meningkatnya pH, seperti yang terlihat pada Gambar 2.1 dan garis diberi label a) dan b). Untuk setiap produk oksidasi stabil yang terjadi pada logam, garis vertikal ditarik sesuai dengan potensial kesetimbangan mereka. Hal ini tergantung pada konsentrasi tertentu, misalnya $10^{-6} \text{ mol / dm}^3$.

Berdasarkan diagram ini, dapat dilihat apakah logam bersifat aktif, pasif atau kebal. Diagram Pourbaix pada **Gambar 2.1** menunjukkan bahwa aluminium bersifat pasif antara pH 3 dan 5, pada potensial yang lebih tinggi dari -1,7 mV SHE. Menurut diagram, aluminium tidak kebal sampai potensinya mencapai di bawah -1,7 V SHE di lingkungan asam dan bahkan aluminium harus memiliki potensial yang lebih rendah ketika berada di lingkungan pH yang terelevasi, sesuai dengan diagram. Penelitian ini telah menunjukkan bahwa aluminium praktis tidak memiliki zona kekebalan, karena pembentukan hidrida aluminium yang membuat oksida tidak stabil.

(Nisancioglu, 1994)



Gambar 2. 1 Diagram pourbaix untuk Aluminium murni di lingkungan air laut.

(Makanas dkk., 2011)



2.5 Paduan Fe-Al

Paduan Fe dari paduan Fe-Al digunakan cukup luas karena kombinasi yang baik pada sifat-sifat mekanik dan magnetik. Disamping aplikasi sebagai material fungsional paduan Fe-Al juga dilirik untuk diaplikasikan pada struktur karena memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan besi, ketahanan korosi yang tinggi dan tidak mahal. Paduan biner Fe-Al dengan kandungan Al yang cukup akan menghasilkan dua fasa order yaitu DO_3 (Fe_3Al) dan B2 ($FeAl$).

Fasa Fe_3Al stabil pada temperatur yang lebih rendah sedangkan fasa Fe-Al stabil pada temperatur yang lebih tinggi. untuk kandungan $Al < 35\%at$. Pada temperatur tinggi, paduan Fe-Al akan membentuk larutan padat dengan struktur Kristal BCC yang disordered. Besi dan Aluminium dapat membentuk senyawa intermetalik yang berbeda-beda yang tergantung terhadap kandungan Al. Empat fasa yang berbeda akan terbentuk, yaitu:

1. Fasa α -Fe (A2), larutan padat yang disordered dengan struktur kristal BCC dan Al dapat terlarut sampai dengan konsentrasi 20%at pada temperatur kamar.
2. Fasa γ -Fe, larutan padat yang disordered dengan struktur Kristal FCC dan Al hanya dapat larut sampai dengan konsentrasi $> 1,3\%at$
3. Fasa ordered FeAl dengan struktur Kristal kubik (B2) mirip seperti CsCl dan pembentukannya berasal dari transformasi α -Fe
4. Fasa ordered Fe_3Al dengan struktur Kristal seperti (DO_3) dan pembentukannya melalui transformasi pada fasa FeAl.

Besi aluminide dengan fasa Fe_3Al dan FeAl cukup menarik untuk dikembangkan menjadi kandidat sebagai material temperatur tinggi. Material ini sangat ekonomis



dan mempunyai ketahanan aus yang baik, dan juga memiliki ketahanan oksida, sulfidisasi dan korosi yang sangat baik. Oksida-oksida yang terbentuk selama proses oksidasi yaitu $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeAl}_2\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$. Dengan peningkatan kandungan aluminium dalam paduan akan menyebabkan semakin mudahnya pembentukan lapisan protektif Al_2O_3 dan akan menyebabkan semakin mudahnya pembentukan lapisan protektif Al_2O_3 dan akan menyebabkan paduan yang dihasilkan semakin tahan terhadap oksidasi pada temperatur tinggi.

(Sastrakencana, 2008)

2.6 Teknologi Pelapisan

Pelapisan (coating) adalah proses penambahan atau penumpukan suatu material ke suatu permukaan material lain (atau material yang sama). Pada umumnya pelapisan diterapkan ke suatu permukaan dengan tujuan untuk:

1. Melindungi permukaan dan lingkungan yang mungkin menyebabkan korosi atau deterioratif (merusak).
2. Untuk meningkatkan penampilan permukaan.
3. Untuk memperbaiki permukaan atau bentuk suatu komponen tertentu dan lain-lain.

Pelapisan terdiri atas bermacam-macam teknik pelapisan dan pemilihannya didasarkan atas permintaan fungsional (ukuran, bentuk, dan metalurgi substrat), kemampuan adaptasi material pelapis terhadap teknik yang digunakan, tingkat adhesi (perekatan) yang diminta, serta ketersediaan dan harga peralatannya. Teknik-teknik ini dibagi menjadi *metallic* dan *non metallic*. *Metallic coating deposition* dibagi menjadi tiga kategori. Ada tiga teknik dalam *hard facing* yaitu *cladding*, *welding*, dan *thermal spraying*.

Pada teknik *cladding*, lembaran logam (ketebalan antara 10 mikron sampai beberapa mm) dilekatkan secara



metalurgi ke substrat logam untuk menghasilkan struktur komposit. Terdapat beberapa teknik *cladding* yaitu deformasi *cladding*, *diffusion bonding*, *braze cladding*, *weld cladding*, dan *laser cladding*. Pada deformasi *cladding*, logam dilekatkan oleh kombinasi gross plastic flow (oleh tekanan) atau impact (benturan), dan panas untuk menimbulkan kontak dan intermixing. Pada *diffusion bonding*, panas dan tekanan di bawah lingkungan yang terkendali menyebabkan penggabungan dua buah permukaan yang bersentuhan. Pada *braze cladding*, permukaan yang ditempel dilapisi seperti sandwich dengan *material brazing* (bentuknya bubuk, pasta, *rod*, kawat (*wire*), strip atau *foil*), dan dilekatkan secara metalurgi dengan pemanasan. Pada *weld* atau *laser cladding*, logam dilelehkan atau didifusikan ke substrat. Logam pelapis bisa dalam bentuk *cast rod*, strip, *wire*, atau bubuk (*powder*) dan dilelehkan dengan busur api plasma untuk *weld cladding*, atau dengan sorotan laser untuk *laser cladding*. (Pawlowski, 2008)

2.7 Thermally Sprayed Coating

Thermal spray merupakan salah satu teknik rekayasa permukaan, yaitu dengan mendepositkan partikulat dalam bentuk cair, semi-cair, atau padat ke substrat atau sekelompok proses dimana material pelapis (*feedstock material*) dipanaskan dan didorong sebagai partikel individu atau *droplets* ke suatu permukaan (*base material/substrat*). (Pawlowski, 2008)

Coatings atau bahan pelapis dapat diterapkan untuk melindungi logam terhadap lingkungan korosif. Kedua lapisan organik dan logam yang digunakan, memiliki sifat yang berbeda dan berbagai penggunaan. Persamaan kedua coating tersebut adalah mereka berfungsi untuk μ mengisolasi logam terhadap media korosif. Sedangkan perbedaan utama kedua *coating* tersebut adalah bahwa *coating* logam bersifat konduktif, sedangkan *coating* organik tidak. *Thermally sprayed coatings* memberikan permukaan yang fungsional untuk melindungi atau

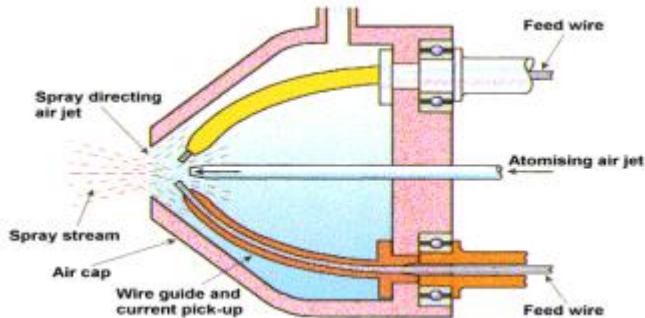


memodifikasi perilaku substrat yang ingin diberikan proteksi. (Dorfman, 2005).

Coating metalik mempunyai dua fungsi, Pertama, coating berperan sebagai pelindung terhadap lingkungan, dengan ketahanan korosi yang lebih baik dibanding substrat metal. Kedua, coating selalu dipilih dengan potensial korosi yang lebih aktif dibanding substrat dan korosi galvanik untuk memberikan proteksi katoda pada coating yang cacat. (A.Jones, 1992)

Ada beberapa metode yang berbeda untuk penyemprotan, tetapi semua didasarkan pada prinsip yang sama. bahan *coating*, kawat atau bubuk, dimasukkan ke dalam pistol penyemprotan, dipanaskan hingga mencapai kondisi cair atau semi cair dan dilontarkan oleh gas atau udara ke arah komponen yang ingin dilindungi. logam menempel pada komponen seperti percikan dan kemudian mendingin. Mekanisme ikatan yang terbentuk biasanya terjadi secara mekanik, dan dalam beberapa kasus ikatan terjadi secara metalurgi. Setiap lapisan menempel dengan lapisan sebelumnya, menyusun struktur lamelar, yang sayangnya biasa terjadi dengan beberapa inklusi, oksida dan pori-pori. Proses yang digunakan pada spesimen TSA dalam tesis ini, adalah *arc spraying process*. Dua kabel logam bertemu di aliran gas yang telah teratomisasi dan adanya perbedaan potensial listrik menyebabkan kawat teratomisasi atau mencair dan akhirnya menempel pada substrat. Kekuatan adhesinya bisa mencapai 6 000-8 000 psi dan mengandung porositas 3 - 8%. (Siegmund, 1997)

Skema metode *Thermal Arc Spraying Process* dapat dilihat pada **Gambar 2.2** di bawah ini.



Gambar 2. 2 Skema Thermal Arc Spraying Process

(Hup, 2010)

Energi termal yang digunakan untuk melelehkan material pelapis dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu electrical dan flame heating. Saat material dipanasi mereka berubah menjadi keadaan plastis atau meleleh dikurung serta diberi percepatan oleh aliran gas bertekanan ke substrat. Partikel-partikel tersebut menabrak substrat, menempel, dan membentuk lapisan tipis (*splats*) yang menyesuaikan dan menempel pada permukaan tidak rata pada substrat dan dengan partikel pelapis yang lain. Kemudian setelah dingin terbentuk lapisan yang tidak homogen dan umumnya terdapat derajat porositas dan oksida logam. Material *feedstock* dapat berupa apa saja yang dapat dilelehkan termasuk logam senyawa logam, cerment oksida, gelas, dan polimer, dapat juga dalam bentuk *powder*, *wire* atau *rod*. Pengikat antara susbstrat dan pelapis dapat berupa ikatan mekanik, kimia, metalurgi atau kombinasi ketiganya. Sifat-sifat pelapis bergantung pada jenis material, proses *thermal spray* dan parameter-parameter yang diterapkan, dan perlakuan setelah proses *thermal spray* pada pelapis. Adapun karakteristik pelapisan dengan teknik *thermal spraying* adalah sebagai berikut:

1. Kekerasan, berat jenis, dan porositas



Pelapisan *thermal spray* sering digunakan karena derajat kekerasannya yang lebih tinggi jika dibandingkan pelapisan cat (*paint coatings*) ataupun *electroplating*. Kekerasan dan ketahanan korosinya membuat pelapisan *thermal spray* sangat bernilai pada pemakaian dengan tingkat keausan tinggi. Kekerasan dan berat jenis lapisan *thermal spray* umumnya lebih rendah bila dibandingkan material *feedstock* itu sendiri sebelum dilapiskan. Pada pelapisan logam *thermal spray*, kekerasan dan berat jenis bergantung pada material yang digunakan, jenis peralatan *thermal spray*, dan parameter-parameter yang digunakan. Secara umum semakin tinggi kecepatan partikel, semakin tinggi pula tingkat kekerasan dan berat jenisnya. Kecepatan partikel yang dihasilkan oleh proses-proses *thermal spray* dari yang tertinggi adalah *detonation*, *high velocity oxy-fuel* (HVOF), busur api plasma, busur api *wire*, dan *flame spray*. Kekerasan dan berat jenis juga bergantung pada temperatur gas atomisasi yang digunakan. Porositas yang terbentuk bergantung pada proses *thermal spray*, parameter yang digunakan dan material *thermal spray*.

2. Ketahanan Korosi

Lapisan logam *thermal spray* dapat *anodic* atau *cathodic* terhadap substrat logam di bawahnya, karena korosi muncul pada anoda, lapisan *anodic* terkorosi pada lingkungan korosif sedangkan katoda tidak. Sistem pelapisan anti-korosi umumnya dirancang sehingga material pelapis *anodic* terhadap logam substrat. Pelapis *anodic* terkorosi atau dikorbankan untuk melindungi substrat. Pada beberapa kasus, ketahanan korosi dan material pelapis itu sendiri sangat penting. Pada penggunaan di temperatur tinggi dan untuk penggunaan dengan bahan kimia, lapisan *thermal spray* harus sangat tahan korosi.

3. Perekatan (adhesi)



Pelapisan *thermal spray* mempunyai adhesi yang sangat tinggi. Pelapisan khusus untuk ketahanan aus, yang dilakukan dengan proses *thermal spray* dengan kecepatan partikel yang sangat tinggi dapat memiliki adhesi regang (*tensile adhesion*) >34.000 kPa (5000 psi). (Schoop dan Guenther, 1917)

Keuntungan *thermally sprayed coatings* adalah bahwa metode ini mudah untuk diterapkan, murah untuk dioperasikan, dan untuk beberapa metode, misalnya *arc wire process*, peralatan dapat diangkut dan penyemprotan dapat dilakukan di situs. Umur *thermally sprayed aluminium* juga lebih unggul jika dibandingkan dengan pelapis organik, dengan umur hidup diperkirakan lebih dari 30 tahun di zona percikan (*splash zone*) dengan ketebalan *TSA coating* 200 mikron yang diterapkan sesuai dengan standar saat ini. (Fischer, 1995)

Thermally sprayed coatings memiliki beberapa bidang aplikasi: ketahanan aus, penyelamatan, dan perbaikan & ketahanan korosi. Untuk aplikasi ketahanan korosi, *coatings* dapat dibagi ke dalam tiga kelompok: anodik, katodik dan *coating* netral. Persamaan semua jenis *coating* tersebut adalah bahwa ketiganya menghambat lingkungan korosif pada permukaan substrat yang dilindungi.

Coating Anodik, dimana *coating* bersifat relatif anodik terhadap komponen, dapat berfungsi sebagai anoda korban jika terjadi kasus kerusakan atau kebocoran pada *coating*. Mereka hampir semuanya terbuat dari seng dan aluminium. Aluminium telah diklaim sebagai logam yang paling efektif untuk perlindungan baja dalam struktur lepas pantai.

Coating katodik, contohnya seperti *coating* yang terbuat dari *stainless steel* atau paduan nikel, yang bersifat katodik terhadap substrat. Mereka memberikan perlindungan korosi yang sangat baik, tetapi jika terjadi kasus kerusakan yang terjadi pada lapisan *coating*, maka justru *coating* jenis ini secara dramatis dapat mempercepat korosi pada komponen yang dilindungi. Dalam *coating* yang bersifat katodik, sangat penting



untuk memiliki lapisan *coating* yang padat, tebal, dan juga sebaiknya disegel dengan *sealant*.

Coating netral memberikan ketahanan korosi yang sangat baik untuk lingkungan yang paling korosif sekalipun dengan bertindak sebagai penghambat untuk media korosif. *Coating* jenis ini tidak mempercepat atau memperlambat korosi substrat jika terjadi kasus seperti kerusakan atau kebocoran pada lapisan *coating*. Korosi yang terjadi di antara substrat dan *coating* harus dihindari untuk mencegah pemisahan lapisan *coating* substrat. Lapisan *coating* yang tebal dan padat juga sangat penting untuk *coating* netral. Contoh bahan yang digunakan dalam *coating* netral adalah keramik alumina dan kromium oksida. (Dorfman, 2005)

2.8 Penelitian Sebelumnya

1. Setiawan, Sugiono (2013) meneliti tentang “Pengaruh Variasi Sudut *Nozzle* dan Jarak *Nozzle* pada *Arc Spray Coating* Terhadap Ketahanan Abrasif Lapisan 13% *Chrome Steel*. Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa nilai ketahanan abrasif dan kekerasan tertinggi didapat pada sudut 90° dengan jarak *nozzle* 200 mm.
2. Khun, N.W. (2013) meneliti tentang “*Effect of carbon nano tube content on adhesion strength and wear and corrosion resistance of epoxy composite coatings on AA2024-T3*”. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin baik kekuatan adhesi, maka semakin baik pula ketahanan abrasif dan ketahanan korosinya.
3. Larasati, Fitrianova (2013) meneliti “Pengaruh Jarak *Nozzle* dan Tekanan Gas pada Proses Pelapisan Ni-20Cr dengan Metode *Wire Arc Spray* terhadap Ketahanan Thermal”. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa daya lekat tertinggi dan porositas terkecil didapatkan pada jarak *nozzle* 300 mm dengan tekanan gas sebesar 4 bar.
4. Zhang, Ping (2016) meneliti tentang “*Preparation and Characterization of MoS₂-Ti_L/MoS₂-Ti_H Nano Multilayer*



Coating with Excellent Wear Properties” yang menunjukkan hasil bahwa *multilayer coatings* memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan *monolayer coatings*.

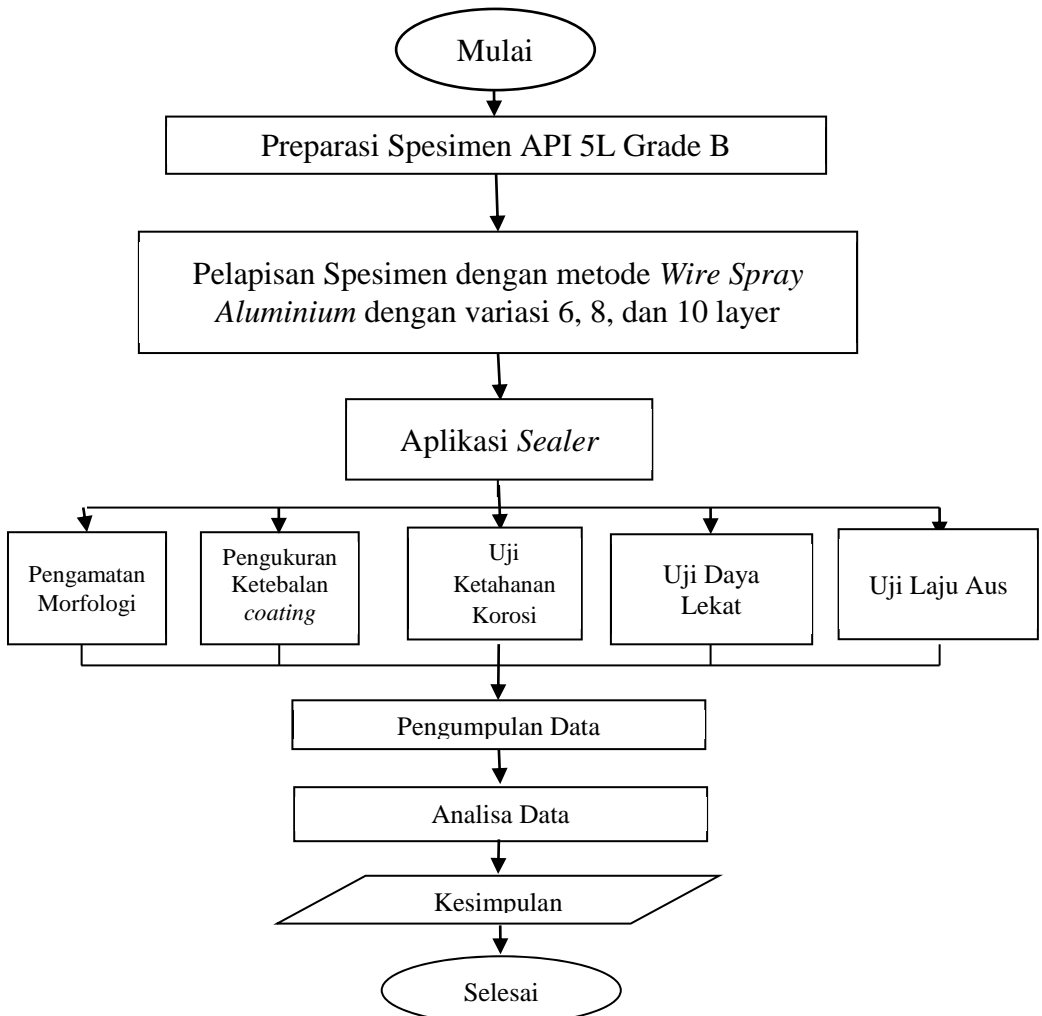
5. Gomes, E.C. (2010) melakukan penelitian tentang “*Corrosion Protection by Multilayer Coating Using Layer-by-layer Technique*”. Hasil penelitian ini menyebutkan bahwa ketahanan korosi semakin baik seiring dengan naiknya jumlah layer, hingga pada suatu jumlah layer (10 layer) yang menyebabkan ketahanan korosinya menurun.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Percobaan



3.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. Baja API 5L Grade B

Tabel 3. 1 Komposisi Kimia Material API 5L Grade B
(Institute,2004)

Elemen	Kadar
<i>Ferrum</i>	Balanced
<i>Carbon</i>	0.22
<i>Mangan</i>	1.2
<i>Phospor</i>	0.025
<i>Sulfur</i>	0.014
<i>Titanium</i>	0.04

2. Aluminium wire 99,8% Al

3.3 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. Gerinda potong
Digunakan untuk memotong spesimen uji.
2. Alat *Wire Arc Spray*
Digunakan untuk meleburkan aluminium dan menyemburkannya ke substrat baja API 5L Grade B.





Gambar 3. 2 Alat Wire Arc Spray

3. DFT Gauge (*Dry Film Thickness*)

Digunakan untuk mengukur ketebalan *coating* saat *coating* sudah kering.



Gambar 3. 3 DFT Gauge

4. Alat Sandblast

Untuk membuat profil (kekasaran) pada permukaan spesimen dan membersihkan permukaan spesimen API 5L Grade B terhadap kontaminan seperti minyak, *scale*, dan karat hingga mencapai standar SA 3.



Gambar 3. 4 Alat Sandblast



5. Alat Uji *Pull-Off*

Alat ini digunakan untuk menguji daya lekat antara material *coating* dengan permukaan substrat. Alat ini bernama *PosiTest AT-M Adhesion Tester*.



Gambar 3. 5 Alat Uji *Pull-Off*

6. Alat Uji Laju Keausan

Digunakan untuk mengetahui nilai laju keausan spesimen. Alat ini dinamakan Pin-on-disk Tribometer.

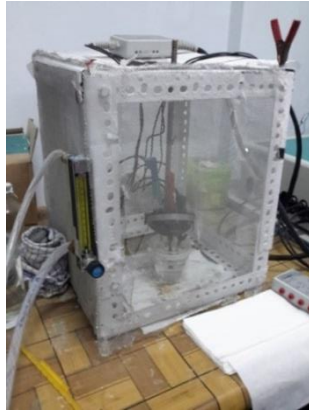


Gambar 3. 6 Pin-on-disk Tribometer



7. Alat Polarisasi Potensiodinamik

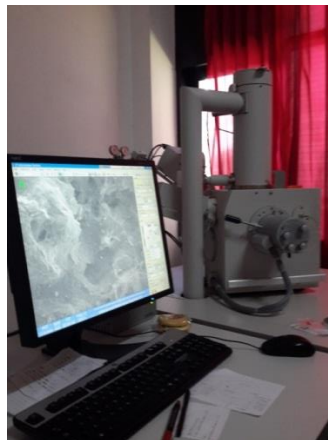
Digunakan untuk menganalisa laju korosi pada spesimen.



Gambar 3. 7 Alat Polarisasi Potensiodinamik

8. Alat SEM

Digunakan untuk menganalisa morfologi permukaan yang telah dilapisi material *coating*.





Gambar 3. 8 Scanning Electron Microscope

3.4 Metode Penelitian

Guna mendapatkan hasil yang diharapkan maka dalam penelitian ini dilakukan tahap-tahap percobaan sebagai berikut:

3.4.1 Preparasi Spesimen API 5L Grade B

Preparasi spesimen diawali dengan memotong spesimen dengan dimensi 100mm x 50mm x 3mm sebanyak 18 spesimen. Setelah spesimen dipotong menjadi 18 spesimen, kemudian material dibersihkan dan dikasarkkan dengan metode *sandblasting* hingga mencapai standar SA 3 dengan tipe *abrasive material*nya berupa pasir *aluminium oxide*. Tujuan dilakukannya *sandblasting* adalah untuk membentuk profil permukaan substrat menjadi kasar, agar material *coating* dapat menempel secara mekanik pada substrat. Persiapan permukaan *sandblasting* ini dilakukan berdasarkan standar ISO 8501-1.

3.4.2 Proses Pelapisan

Pada proses pelapisan, digunakan parameter *feedstock material*, tekanan gas, jarak *nozzle*, sudut *nozzle*, arus listrik, dan voltase sebagai berikut:

1. *Feedstock material*: Aluminium wire 99,8% Al
2. Tekanan gas : 4 bar
3. Jarak *nozzle* : 300 mm
4. Sudut *nozzle* : 90°
5. Arus listrik : 145 Ampere
6. Voltase : 26,7 Volts

Proses *wire arc spray*, langkah awal yang dilakukan yaitu *wire* Aluminium pertama dialiri oleh arus positif, sedangkan aluminium *wire* kedua dialiri oleh arus negatif, yang kemudian kedua *wire* dipertemukan di dalam *spray gun* yang menimbulkan percikan dan melelehkan aluminium. Setelah itu, lelehan aluminium diekspos dengan gas bertekanan yang



mengakibatkan percikan (*splats*) aluminium terlempar dari *spray gun* dan terdeposisi di permukaan substrat baja. Variasi dalam proses pelapisan ini adalah *multilayer* dengan jumlah layer 6, 8, dan 10 layer. Setelah proses pelapisan dengan aluminium selesai, selanjutnya spesimen dilapisi dengan *sealer* berupa *silicon aluminium oxide* untuk menutupi poros yang ada pada material pelapis.

3.5 Pengujian

3.5.1 Morfologi dan Komposisi Hasil Coating

Analisis morfologi permukaan hasil coating dan ketebalan lapisan coating pada penampang melintang diinvestigasi menggunakan *Scanning Electron Microscope*. Sedangkan komposisi hasil *coating* diamati menggunakan EDX. Tujuan analisa ini adalah untuk mengukur ketebalan lapisan *coating*, menganalisis morfologi lapisan *coating*, dan mengetahui komposisi yang terbentuk pada lapisan *coating*. Penelitian ini menggunakan alat SEM FEI S50.

1.5.2 Ketebalan Coating

Ketebalan *coating* diukur dengan menggunakan alat DFT (*Dry Film Thickness*) Gauge Elcometer. Alat ini mengukur ketebalan film *coating* saat sudah kering.

3.5.3 Kekuatan Adhesi Coating Terhadap Substrat

Pengujian *Pull Off Bonding* ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan adhesi antara *coating* dengan substrat. *Pull-off Bonding* ini dilakukan dengan menggunakan alat *PosiTest AT-M Adhesion Tester* dengan standar ASTM D-4541.

3.5.4 Analisis Laju Korosi



Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui laju korosi yang terjadi pada baja karbon yang telah dilapisi dengan variasi *multilayer* dan material *coating* aluminium, pada media lingkungan NaCl 3,5%. Variasi yang digunakan yaitu tanpa *layer*, 6 *layer*, 8 *layer*, dan 10 *layer*. Lama pengujian yang dilakukan selama lebih kurang 15 menit per spesimen dengan menggunakan larutan NaCl 3,5% dengan metode polarisasi potenciodinamik (tafel).

Parameter yang digunakan pada pengujian tafel ini ditampilkan pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3.2 Parameter Pengujian Tafel

Elektroda Kerja	Aluminium
<i>Equivalent Weight</i> (g/mol)	27
Densitas (g/cm ³)	2.7
Luasan Terekspos (cm ²)	0.81
<i>Counter Electrode</i>	Platina
<i>Reference Electrode</i>	Ag/AgCl
<i>Scan Rate</i> (V/s)	0.001
<i>Start Potential</i> (V)	- 0.1
<i>Finish Potential</i> (V)	+0.1

3.5.5 Ketahanan Aus

Untuk melihat ketahanan spesimen uji terhadap keausan, perlu dilakukan uji laju keausan terhadap spesimen yang telah dilakukan proses *coating*. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat *Pin-on-disc Tribometer*. Sebelum pengujian dilakukan, spesimen ditimbang berat awalnya, kemudian spesimen diletakkan pada sebuah *holder*. Setelah spesimen uji siap, spesimen kemudian diekspos dengan sebuah piringan abrasif yang berputar dengan kecepatan 200-250 rpm selama ± 1



jam. Setelah itu, spesimen ditimbang berat akhirnya untuk mendapatkan nilai laju keausan per jam pada setiap spesimen.

3.6 Rancangan Penelitian

Pada rancangan penelitian *Wire Arc Spray* API 5L Grade B dilakukan rancangan penelitian sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Rancangan Pengujian Spesimen

Variabel (layer)	Spesimen	Ketebalan (mikron)	SEM	Abrasive Test	Pull Off Test	Tafel	DFT
0	1	-	-	-	-	√	-
	2	-	-	-	-	√	-
	3	-	-	-	-	√	-
6	1	√	√	√	√	√	√
	2	√	√	√	√	√	√
	3	√	√	√	√	√	√
8	1	√	√	√	√	√	√
	2	√	√	√	√	√	√
	3	√	√	√	√	√	√
10	1	√	√	√	√	√	√
	2	√	√	√	√	√	√
	3	√	√	√	√	√	√



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Pengamatan Visual



Gambar 4. 1 Pengamatan visual permukaan *coating*

Pada **Gambar 4.1**, dapat dilihat bahwa permukaan substrat baja API 5L Grade B tertutup oleh *coating* Aluminium secara menyeluruh. Permukaan *coating* tampak menempel ke permukaan substrat dengan sempurna tanpa adanya gumpalan *coating* Aluminium yang terbentuk.

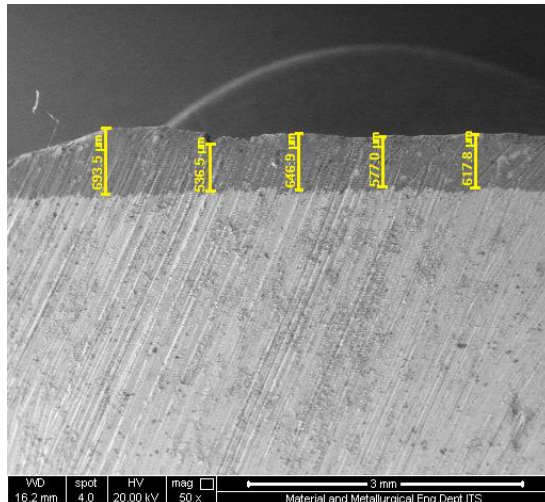
4.1.2 Pengujian Ketebalan

Pengujian ketebalan digunakan untuk mengetahui pengaruh perubahan ketebalan *coating* terhadap banyaknya layer pada proses *coating*. Pengujian ketebalan dilakukan dengan menggunakan alat DFT (*Dry Film Thickness*) Gauge Elcometer. Hasil uji ketebalan dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

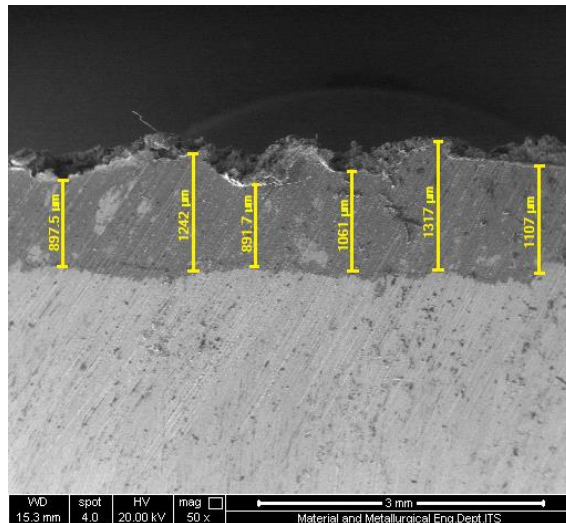
**Tabel 4. 1** Hasil Uji Ketebalan

Variabel (layer)	Ketebalan (μm)	Rata-Rata (μm)
6	936	817,67
	1083	
	434	
8	1318	1184
	896	
	1338	
10	1324	1323,67
	1336	
	1311	

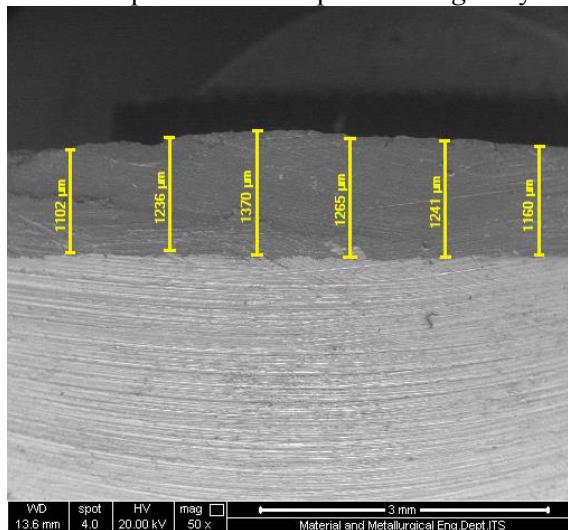
Sebagai perbandingan, pengukuran ketebalan dengan menggunakan SEM dilakukan pada daerah *cross-section*. Ketebalan *coating* yang diukur dengan SEM dapat dilihat pada **Gambar 4.2**, **Gambar 4.3**, dan **Gambar 4.4** di bawah ini.



Gambar 4. 2 Hasil pengukuran ketebalan menggunakan SEM pada *cross-section* perbesaran 50x pada *coating* 6 layer



Gambar 4. 3 Hasil pengukuran ketebalan menggunakan SEM pada *cross-section* perbesaran 50x pada *coating* 8 layer



Gambar 4. 4 Hasil pengukuran ketebalan menggunakan SEM pada *cross-section* perbesaran 50x pada *coating* 10 layer



Pada **Tabel 4.1**, pada variabel 6 layer didapatkan rata-rata ketebalan *coating* 3 spesimen sebesar 817,67 mikron, pada variabel 8 layer sebesar 1184 mikron, dan pada variabel 10 layer didapat nilai sebesar 1323,67 mikron. Dapat dilihat bahwa semakin banyak jumlah layer yang diaplikasikan pada substrat, maka ketebalan *coating* juga semakin besar.

1.1.3 Pengujian Daya Lekat



Gambar 4. 5 Tampilan Permukaan Benda Uji Setelah Pengujian Daya Lekat

Pengujian daya lekat atau adhesi dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan *coating* untuk melekat pada permukaan substrat. Pengujian ini dilakukan berdasarkan standar ASTM D-4541. *Dolly* yang sebelumnya sudah diberikan lem *araldite* kemudian ditarik dengan menggunakan alat *PosiTest AT-M Adhesion Tester*. Pengujian ini dilakukan pada tiga titik yang berbeda untuk setiap sampel dan hasil setiap sampel nilainya diambil rata-ratanya. Hasil uji daya adhesi dapat dilihat



pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4. 2 Hasil Uji Adhesi

Variabel (layer)	Nilai Adhesif (MPa)	Rata-Rata (Mpa)
6	43,21	38,82
	44,01	
	29,23	
8	32,95	35,73
	34,80	
	39,43	
10	38,74	35,41
	38,50	
	28,98	

Pada **Tabel 4.2**, didapatkan data kekuatan lekat ketiga variabel. Pada variabel 6 layer, didapatkan nilai daya lekat *coating* terhadap substrat sebesar 38,82 MPa; variabel 8 layer memiliki kekuatan lekat sebesar 35,73 MPa; dan pada variabel 10 layer, didapatkan kekuatan lekat terendah di antara ketiga variabel, yaitu sebesar 35,41 MPa. Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah lapisan yang diaplikasikan ke permukaan substrat, maka nilai daya lekat *coating* terhadap subtrat semakin rendah.

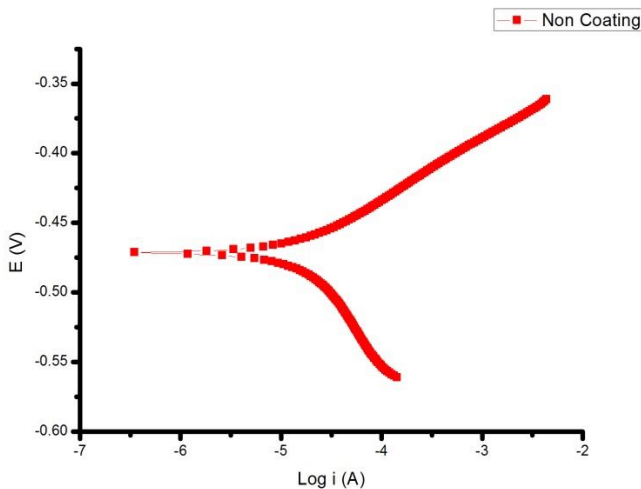
1.1.4 Pengujian Ketahanan Korosi



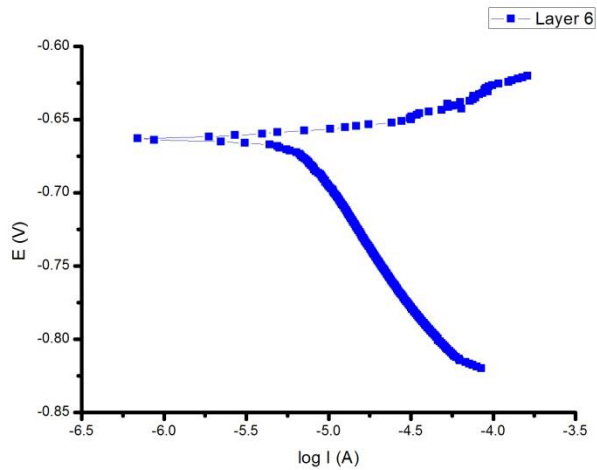
Gambar 4. 6 Benda Uji Tafel



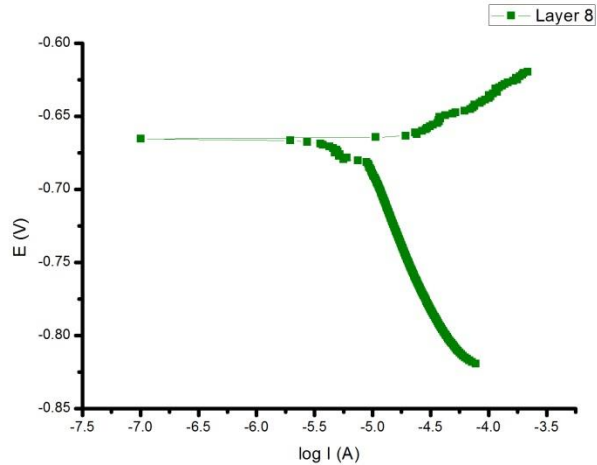
Pengujian ketahanan korosi dilakukan untuk mengetahui perbedaan laju korosi dengan variasi jarak tembakan saat proses pelapisan. Pengujian dengan metode Tafel dilakukan untuk mengetahui laju korosi dalam larutan NaCl 3,5%. Elektroda acuan yang digunakan adalah AgCl dan Platina sebagai elektroda pembantu. Hasil uji Tafel adalah kurva polarisasi dan nilai *corrosion rate* material itu sendiri. Kurva polarisasi untuk spesimen tanpa *coating* dan tiga variabel layer dapat dilihat pada **Gambar 4.7, 4.8, 4.9, dan 4.10**.



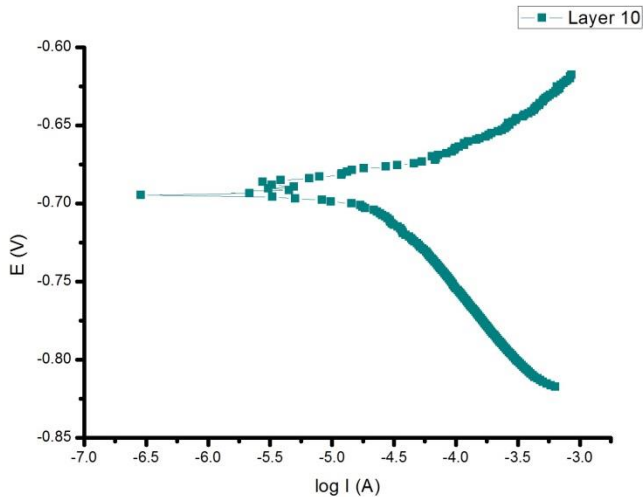
Gambar 4. 7 Kurva Polarisasi Spesimen dengan 0 *Layer*



Gambar 4. 8 Kurva Polarisasi Spesimen *Coating* dengan Variabel 6 *Layer*



Gambar 4. 9 Kurva Polarisasi Spesimen *Coating* dengan Variabel 8 *Layer*



Gambar 4. 10 Kurva Polarisasi Spesimen *Coating* dengan Variabel 10 *Layer*

Nilai laju korosi atau *corrosion rate* dapat dilihat pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4. 3 Nilai *Corrosion Rate*

Variabel (layer)	<i>Corrosion Rate</i> (mm/year)
0	0,29496
6	0,13236
8	0,10012
10	0,019102

Berdasar **Tabel 4.3**, didapatkan nilai ketahanan korosi



ketiga variabel yang dianalisa dengan menggunakan polarisasi potensiodinamik. Ketahanan korosi pada setiap spesimen didapatkan dengan mengukur laju korosi yang terjadi pada setiap spesimen ketika berada di lingkungan NaCl 3,5% (air laut). Pada spesimen yang tidak dilapisi *coating*, didapatkan nilai laju korosinya sebesar 0,29496 mm/year; pada variabel 6 layer didapatkan laju korosi sebesar 0,13236 mm/year; pada variabel 8 layer, didapat laju korosi sebesar 0,10012 mm/year; dan pada variabel 10 layer, memiliki laju korosi yang paling kecil yaitu 0,019102 mm/year. Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah layer diaplikasikan, maka nilai *corrosion rate* atau laju korosi juga semakin rendah.

4.1.5 Pengujian Ketahanan Abrasif

Nilai hasil pengujian ketahanan abrasif atau laju keausan dapat dilihat pada **Tabel 4.4**. Nilai laju aus pada penelitian ini memakai satuan mg/cm²/jam.

Tabel 4. 4 Nilai Laju Aus

Variabel (layer)	Laju Aus (mg/cm ² /jam)
6	5,21
8	5,46
10	5,71

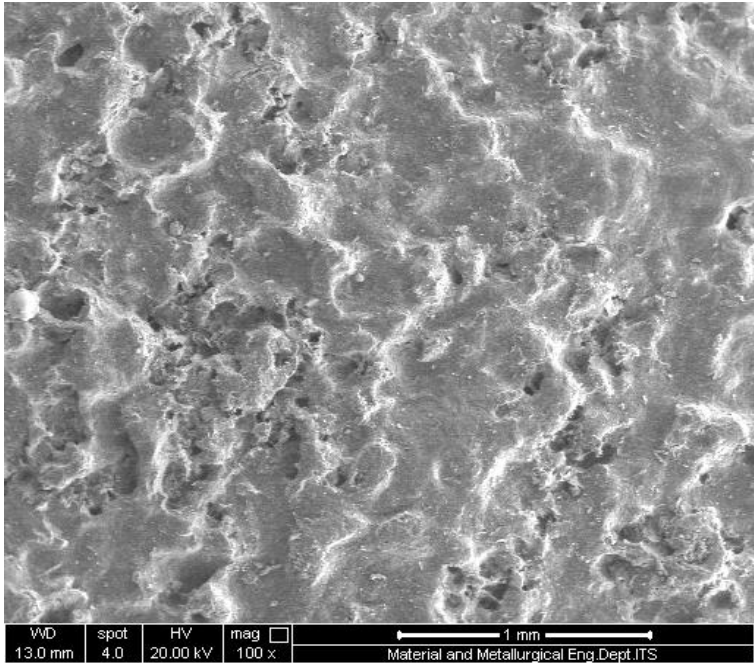
Pada **Tabel 4.4**, didapatkan data nilai ketahanan abrasif atau ketahanan aus ketiga variabel yang dianalisa dengan menggunakan alat *Pin-on-disc Tribometer*. Ketahanan korosi pada setiap spesimen didapatkan dengan mengukur laju aus yang



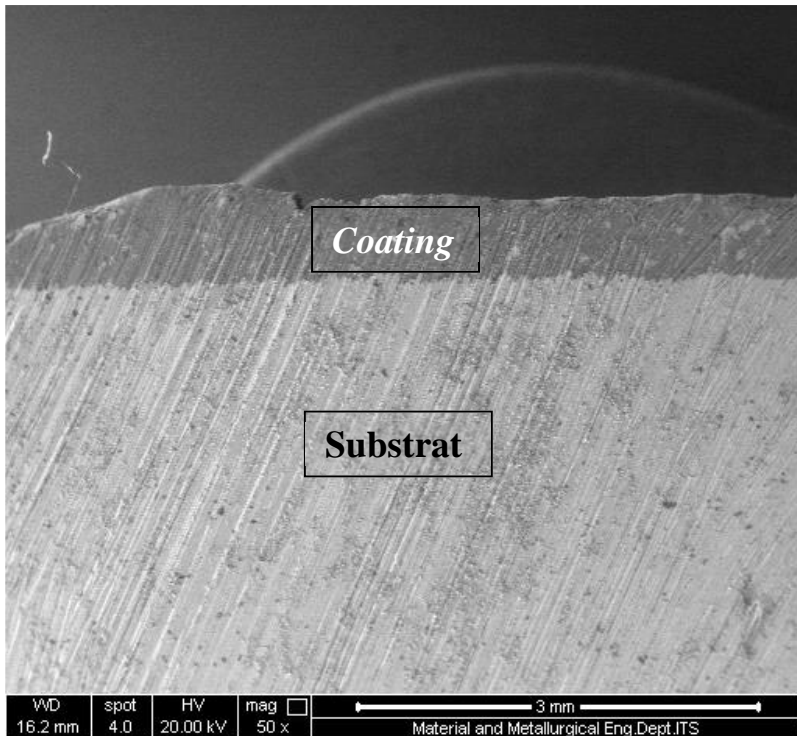
terjadi pada setiap spesimen pada kecepatan putar piringan ± 250 rpm dengan satuan $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$. Pada spesimen dengan variabel 6 layer, didapatkan nilai laju keausannya sebesar $5,21 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$; pada spesimen dengan variabel 8 layer didapatkan laju aus sebesar $5,46 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$; dan pada variabel 10 layer, memiliki laju keausan yang paling cepat yaitu $5,71 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$. Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah lapisan yang diaplikasikan, maka nilai daya lekat *coating* terhadap substrat semakin rendah.

4.1.6 Pengujian Morfologi *Coating*

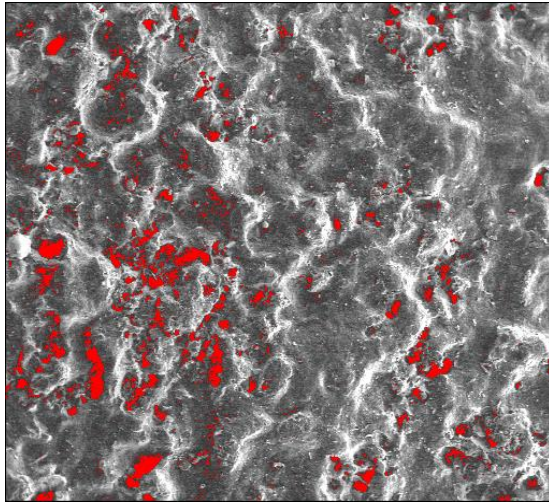
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui morfologi material *coating*. Hal ini ditujukan untuk mengetahui persebaran material *coating* rata atau tidak dan melihat ada tidaknya pori di permukaan material *coating*. Pengujian ini menggunakan mesin SEM (*Scanning Electron Microscope*). Setelah itu, foto morfologi permukaan *coating* yang telah diambil menggunakan *scanning electron microscope* kemudian diolah dengan menggunakan *software* ImageJ untuk menghitung persentase porositas permukaan *coating*. **Gambar 4.9** hingga **Gambar 4.17** masing-masing berurutan menunjukkan morfologi dan hasil pengolahan data permukaan *coating* menggunakan *software* ImageJ dengan variabel 6 layer, 8 layer, dan 10 layer.



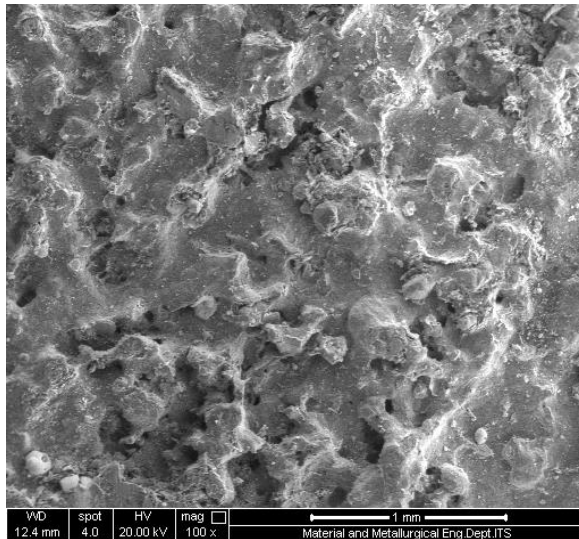
Gambar 4. 11 Morfologi *Coating* pada spesimen dengan variabel 6 layer dengan perbesaran 100x



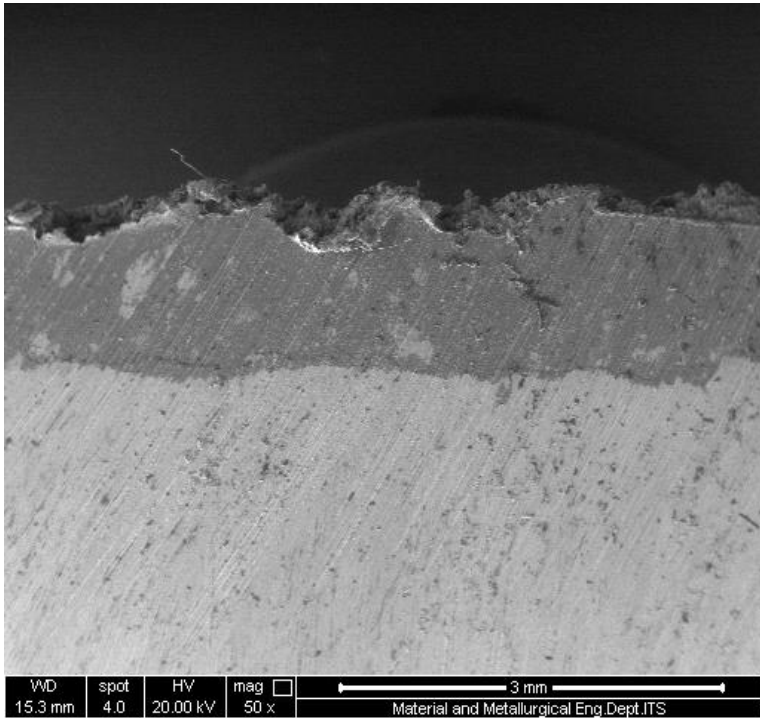
Gambar 4. 12 Morfologi *Coating* pada spesimen dengan variabel 6 layer di *Cross-section* dengan perbesaran 50x



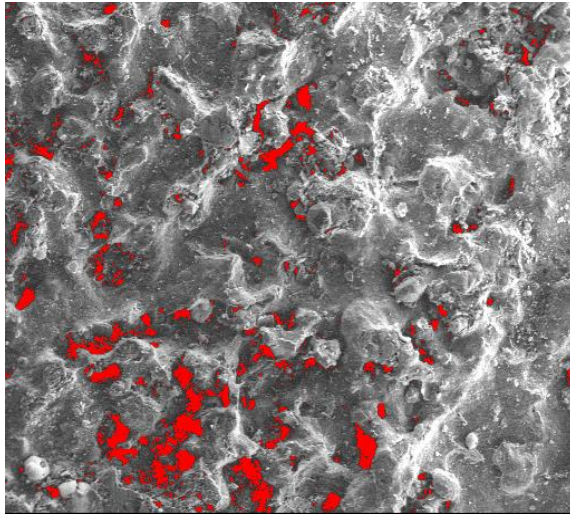
Gambar 4. 13 Kenampakan porositas permukaan pada spesimen variabel 6 layer



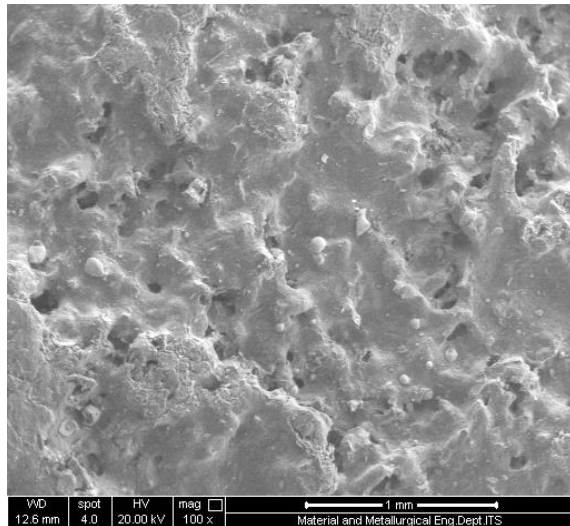
Gambar 4. 14 Morfologi *Coating* pada spesimen dengan variabel 8 layer dengan perbesaran 100x



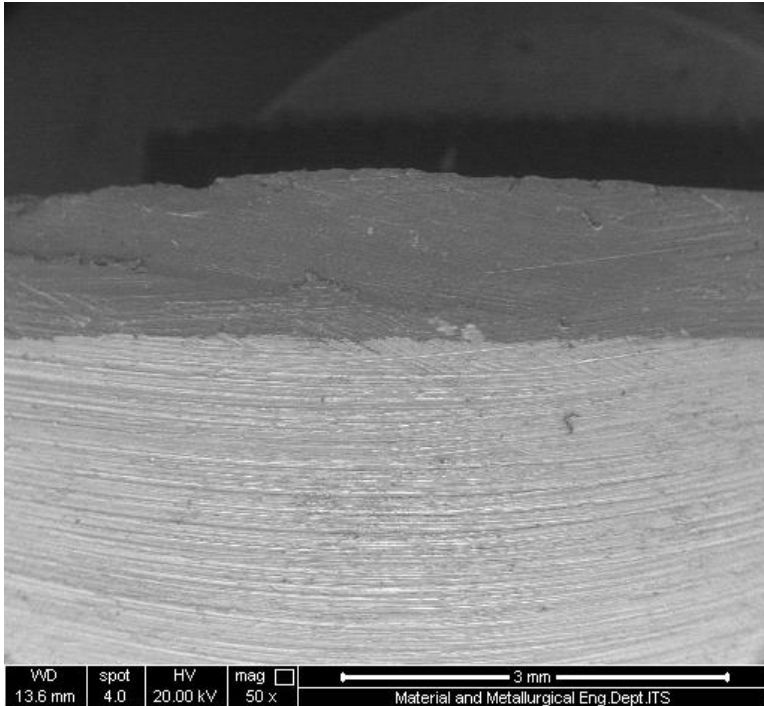
Gambar 4. 15 Morfologi *Coating* pada spesimen dengan variabel 8 layer di *Cross-section* dengan perbesaran 50x



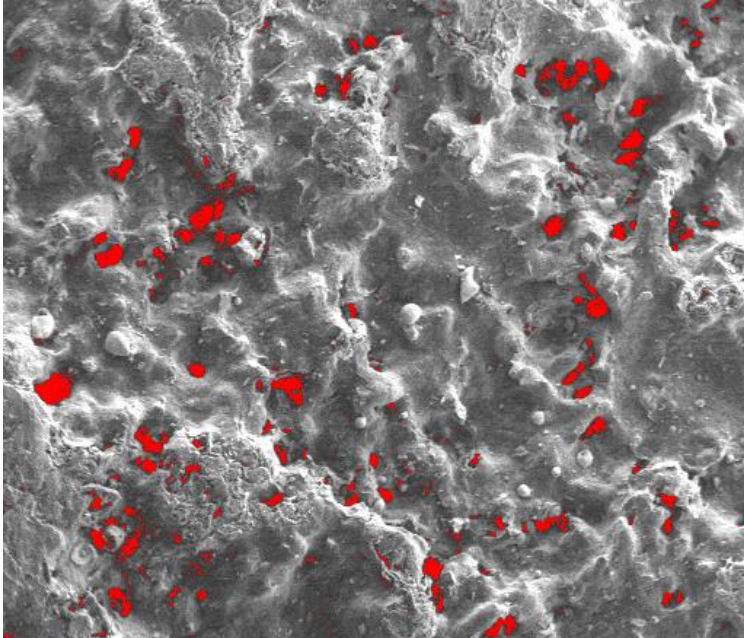
Gambar 4. 16 Kenampakan porositas permukaan pada spesimen variabel 8 layer



Gambar 4. 17 Morfologi *Coating* pada spesimen dengan variabel 10 layer dengan perbesaran 100x



Gambar 4. 18 Morfologi *Coating* pada spesimen dengan variabel 10 layer di *Cross-section* dengan perbesaran 50x



Gambar 4. 19 Kenampakan porositas permukaan pada spesimen variabel 10 layer

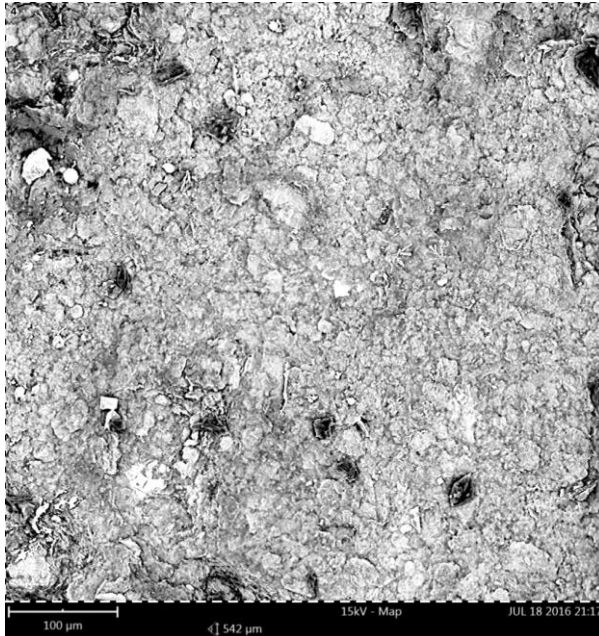
Pada **Gambar 4.10**, **Gambar 4.13**, dan **Gambar 4.16**, terlihat bahwa ketiga variabel menempel secara mekanik dengan sangat baik terhadap substrat baja. Hal ini dibuktikan dengan tingginya daya lekat *coating* ketiga variabel dan tidak adanya gelembung ataupun kotoran yang masuk di antara lapisan *coating* dan substrat.

Pada **Gambar 4.11**, **Gambar 4.14**, dan **Gambar 4.17**, dengan perhitungan menggunakan *software* ImageJ yang berfungsi untuk menghitung persentase porositas yang ada pada permukaan *coating*, pada variabel 6 *layer* didapatkan porositas sebanyak 4,031%; pada variabel 8 *layer*, terdapat porositas sebesar 3,899%; dan pada spesimen dengan variabel 10 *layer*, didapatkan persentase porositas terkecil di antara ketiga variabel








yaitu sebesar 2,552%.

1.1.7 Pengujian EDX



Gambar 4. 20 Morfologi *Coating* pada Pengujian EDX

	Weight percentage	Certainty
Al	 48.0 %	1.00
O	 31.8 %	0.99
Si	 15.7 %	0.99
C	 2.5 %	0.98
Ag	 2.0 %	0.97

Gambar 4. 21 Persentase Komposisi Unsur pada *Coating*

**Tabel 4.5** Komposisi Unsur pada *Coating*

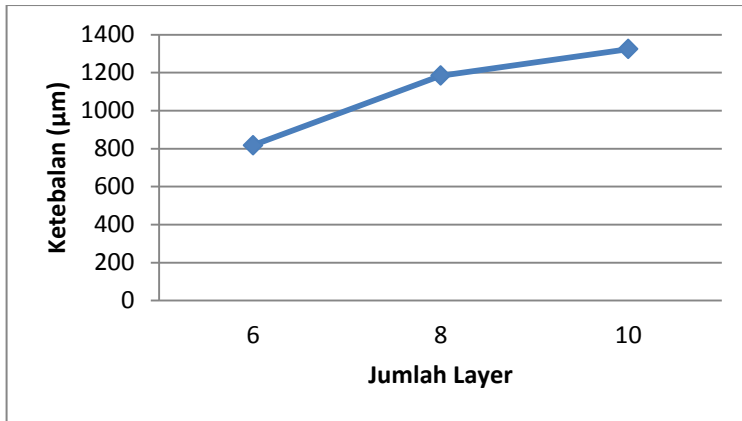
Element Number	Element Symbol	Element Name	Weight Concentration (%)	Error (%)
13	Al	Aluminium	48.0	0.0
14	Si	Silicon	15.7	0.0
8	O	Oxygen	31.8	0.2
6	C	Carbon	2.5	0.1
47	Ag	Silver	2.0	2.2

Berdasarkan **Tabel 4.5**, didapatkan 5 unsur yang berbeda pada *coating*, antara lain Al 48%, Si 15.7%, O 31.8%, C 2.5%, dan Ag 2.0%.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pengujian Ketebalan

Pada **Tabel 4.1**, pada variabel 6 layer didapatkan rata-rata ketebalan *coating* 3 spesimen sebesar 817,67 mikron, pada variabel 8 layer sebesar 1184 mikron, dan pada variabel 10 layer didapat nilai sebesar 1323,67 mikron. Dapat dilihat bahwa semakin banyak jumlah layer yang diaplikasikan pada substrat, maka ketebalan *coating* juga semakin besar. Grafik ketebalan terhadap variabel ditunjukkan oleh **Gambar 4.18**.

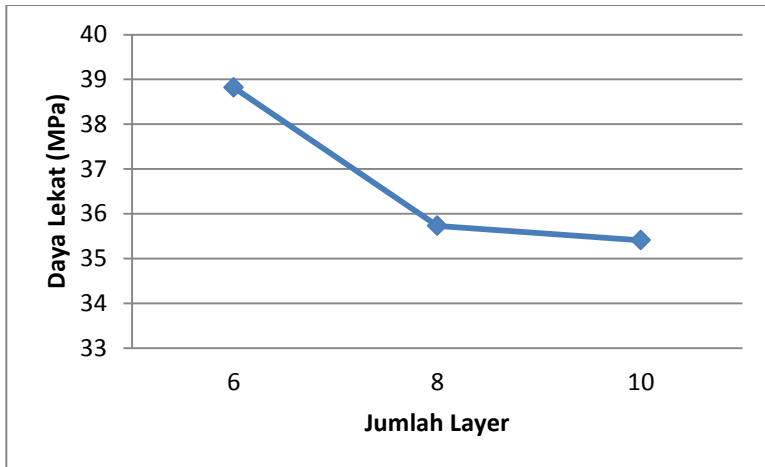


Gambar 4. 22 Grafik Variabel Jumlah Layer vs Ketebalan

Grafik di atas menunjukkan kenaikan nilai ketebalan *coating* seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan *coating* yang diaplikasikan ke permukaan substrat. Hal ini disebabkan karena semakin banyak layer yang diaplikasikan, maka semakin banyak pula logam *coating* yang terdeposisi di permukaan substrat.

4.2.2 Pengujian Daya Lekat

Pada **Tabel 4.2**, didapatkan data kekuatan lekat ketiga variabel. Pada variabel 6 layer, didapatkan nilai daya lekat *coating* terhadap substrat sebesar 38,82 MPa; variabel 8 layer memiliki kekuatan lekat sebesar 35,73 MPa; dan pada variabel 10 layer, didapatkan kekuatan lekat terendah di antara ketiga variabel, yaitu sebesar 35,41 MPa. Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah lapisan yang diaplikasikan ke permukaan substrat, maka nilai daya lekat *coating* terhadap substrat semakin rendah. Hubungan antara jumlah lapisan *coating* dengan daya lekat ditampilkan pada grafik variabel jumlah *layer* vs. daya lekat yang dapat dilihat pada **Gambar 4.19**.



Gambar 4. 23 Grafik Variabel Jumlah Layer vs Daya Lekat

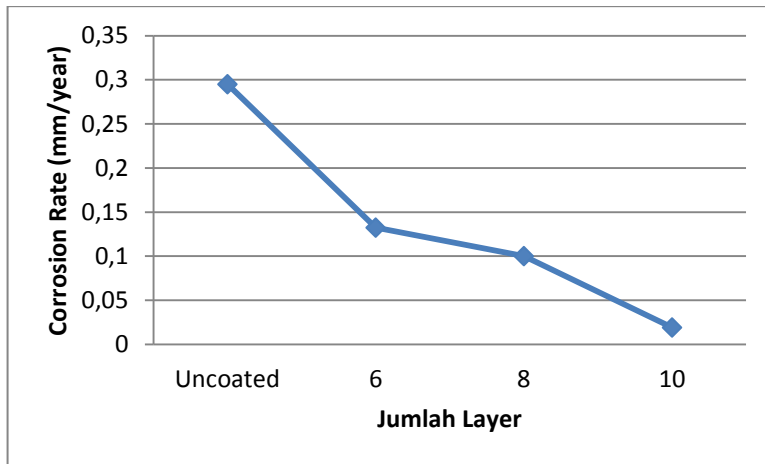
Grafik di atas menunjukkan bahwa jumlah *layer* dan daya lekat memiliki hubungan yang berbanding terbalik; semakin banyak jumlah *layer* yang diaplikasikan, maka semakin kecil daya lekat *coating* terhadap substrat. Hal ini berhubungan dengan kemungkinan terjadi kegagalan kohesif pada lapisan yang semakin tebal, yang dikarenakan ikatan yang terjadi di pertengahan *coating* lebih lemah dibandingkan ikatan mekanik antara permukaan substrat dan *coating*.

4.2.3 Pengujian Ketahanan Korosi

Pada **Tabel 4.3**, didapatkan nilai ketahanan korosi ketiga variabel yang dianalisa dengan menggunakan polarisasi potenciodinamik. Ketahanan korosi pada setiap spesimen didapatkan dengan mengukur laju korosi yang terjadi pada setiap spesimen ketika berada di lingkungan NaCl 3,5% (air laut). Pada spesimen yang tidak dilapisi *coating*, didapatkan nilai laju korosinya sebesar 0,29496 mm/year; pada variabel 6 layer didapatkan laju korosi sebesar 0,13236 mm/year; pada variabel 8 layer, didapat laju korosi sebesar 0,10012 mm/year; dan pada



variabel 10 layer, memiliki laju korosi yang paling kecil yaitu 0,019102 mm/year. Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah layer diaplikasikan, maka nilai *corrosion rate* atau laju korosi juga semakin rendah. Hubungan antara variable jumlah *layer* terhadap ketahanan korosi dapat dilihat pada **Gambar 4.20** di bawah ini.



Gambar 4. 24 Grafik Variabel Jumlah *Layer* vs. *Corrosion Rate*

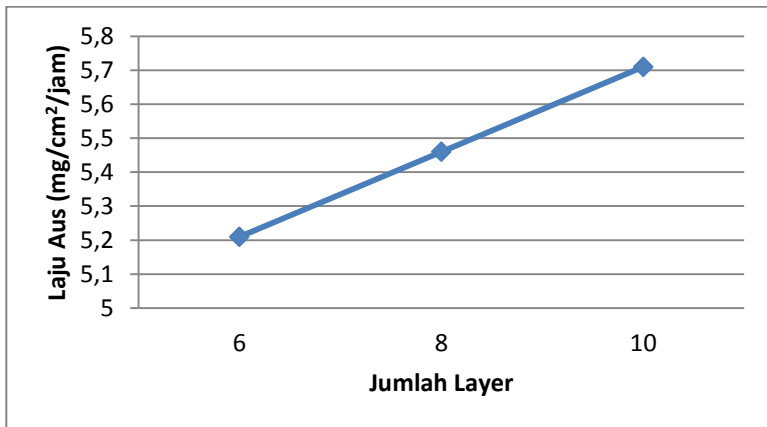
Grafik di atas menunjukkan bahwa hubungan antara jumlah *layer* dan nilai laju korosi merupakan hubungan yang berbanding terbalik; semakin banyak jumlah lapisan *coating*, maka semakin rendah pula laju korosi yang terjadi. Hal ini disebabkan karena semakin banyak jumlah *layer coating*, maka substrat baja API 5L Grade B juga semakin terlindung dengan keberadaan *coating* yang semakin tebal, sehingga masa pakai atau umur baja juga semakin panjang.

4.2.4 Pengujian Ketahanan Aus

Pada **Tabel 4.4**, didapatkan data nilai ketahanan abrasi atau ketahanan aus ketiga variabel yang dianalisa dengan menggunakan alat *Pin-on-disc Tribometer*. Ketahanan abrasi



pada setiap spesimen didapatkan dengan mengukur laju aus yang terjadi pada setiap spesimen pada kecepatan putar piringan ± 250 rpm dengan satuan $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$. Pada spesimen dengan variabel 6 layer, didapatkan nilai laju keausannya sebesar $5,21 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$; pada spesimen dengan variabel 8 layer didapatkan laju aus sebesar $5,46 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$; dan pada variabel 10 layer, memiliki laju keausan yang paling cepat yaitu $5,71 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$. Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah lapisan yang diaplikasikan, maka nilai daya lekat *coating* terhadap substrat semakin rendah. Hubungan antara variable jumlah *layer* terhadap nilai laju keausan dapat dilihat pada **Gambar 4.21** di bawah ini.



Gambar 4. 25 Grafik Variabel Jumlah *Layer* vs Laju Aus

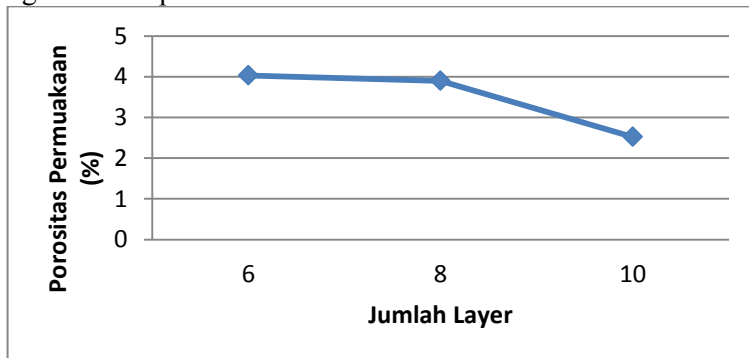
Pada grafik di atas, diketahui bahwa hubungan yang terjadi antara variabel jumlah *layer* dengan laju keausan adalah hubungan yang berbanding lurus, dimana semakin banyak jumlah lapisan yang diaplikasikan, semakin cepat pula keausan terjadi pada permukaan *coating*. Hal ini disebabkan oleh semakin banyak jumlah lapisan yang diaplikasikan saat proses pelapisan, maka daya lekat *coating* terhadap substrat pun juga semakin



turun yang menimbulkan efek domino berupa menurunnya ketahanan aus pada *coating*.

4.2.5 Pengujian Morfologi *Coating*

Pada hasil pengujian morfologi dengan menggunakan SEM, dapat dilihat secara visual pada **Gambar 4.9**, **Gambar 4.12**, dan **Gambar 4.15**, terlihat bahwa permukaan *coating* dengan variabel 6 *layer* memiliki pori yang paling banyak dibandingkan dengan ketiga variabel lainnya; pada variabel 8 *layer* terlihat lebih sedikit pori yang terbentuk jika dibandingkan dengan spesimen dengan variabel 6 *layer*, tetapi tidak sesedikit pori yang ada pada spesimen dengan variabel 10 *layer*. Pengamatan ini dibuktikan pada **Gambar 4.11**, **Gambar 4.14**, dan **Gambar 4.17**, dengan perhitungan menggunakan *software* ImageJ yang berfungsi untuk menghitung persentase porositas yang ada pada permukaan *coating*. Pada variabel 6 *layer* didapatkan porositas sebanyak 4,031%; pada variabel 8 *layer*, terdapat porositas sebesar 3,899%; dan pada spesimen dengan variabel 10 *layer*, didapatkan persentase porositas terkecil di antara ketiga variabel yaitu sebesar 2,552%. Hubungan antara variabel jumlah *layer* dan persentase porositas permukaan digambarkan pada **Gambar 4.22** di bawah ini.

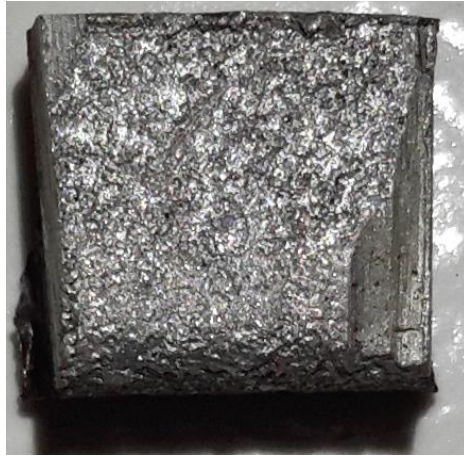


Gambar 4. 26 Grafik Variabel Jumlah *Layer* Vs. Porositas Permukaan



Berdasarkan grafik di atas, diketahui bahwa hubungan antara jumlah *layer* dan persentase porositas permukaan adalah berbanding terbalik, yaitu semakin banyak jumlah *layer*, maka semakin sedikit pori yang terbentuk di permukaan.

1.2.6 Pengujian EDX



Gambar 4. 27 Benda Uji EDX

Berdasarkan **Tabel 4.5**, didapatkan 5 unsur yang berbeda pada *coating*, antara lain Al 48%, Si 15.7%, O 31.8%, C 2.5%, dan Ag 2.0%. Unsur Al dan O (elemen dengan persentase unsur paling besar) merupakan elemen terpenting pada penelitian ini karena kedua elemen tersebut merupakan pembentuk lapisan pasif aluminium yang dapat menghambat terjadinya korosi. Untuk memastikan bahwa lapisan pasif aluminium terbentuk pada lapisan *coating*, dapat dilakukan perhitungan energi potensial aluminium terhadap elektroda standar hidrogen. Pada penelitian ini, digunakan elektroda Ag/AgCl yang memiliki energi potensial -0, 22 Volt dan energi potensial korosi aluminium sebesar -0, 65982 Volt pada pH 6,6. Untuk menghitung E_{Al} (V) (SHE) aluminium, dilakukan perhitungan



sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_{\text{Al}} (\text{V}) (\text{SHE}) - 0,22 &= -0,65982 \\ &= -0,65982 + 0,22 \\ E_{\text{Al}} (\text{V}) (\text{SHE}) &= -0,43982 \text{ Volt} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Hasil perhitungan $E_{\text{Al}} (\text{V}) (\text{SHE})$ di atas dimasukkan ke diagram Pourbaix aluminium yang ditampilkan pada **Gambar 2.1**, dapat dianalisa bahwa $E_{\text{Al}} (\text{V}) (\text{SHE})$ terletak pada zona pasivasi yang membuktikan bahwa lapisan pasif $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ terbentuk di permukaan *coating*. Data komposisi unsur *coating* yang telah dianalisa dengan EDX juga membuktikan bahwa tidak terdapat unsur Fe (Ferrum) pada permukaan *coating* yang menunjukkan bahwa produk korosi tidak terbentuk pada substrat dengan variabel 6 *layer*. Hal ini membuktikan bahwa *coating* dengan variabel *layer* paling tipis yaitu 6 *layer* efektif sebagai proteksi terhadap korosi.

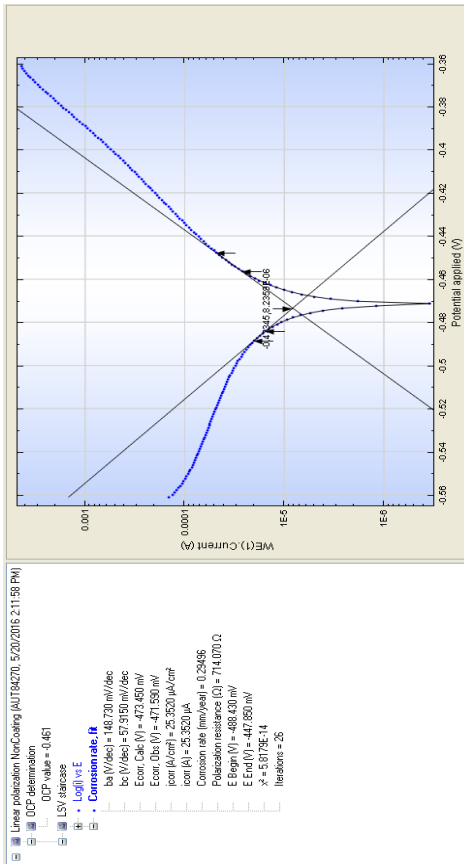
LAMPIRAN

1. Lampiran Data Tafel

Hasil Analisa Polarisasi Linier – Potensiostat Autolab (PGSTAT302N)

Nama Sample : API 5L Grade B Non-Coating

Larutan elektrolit : NaCl 3,5%

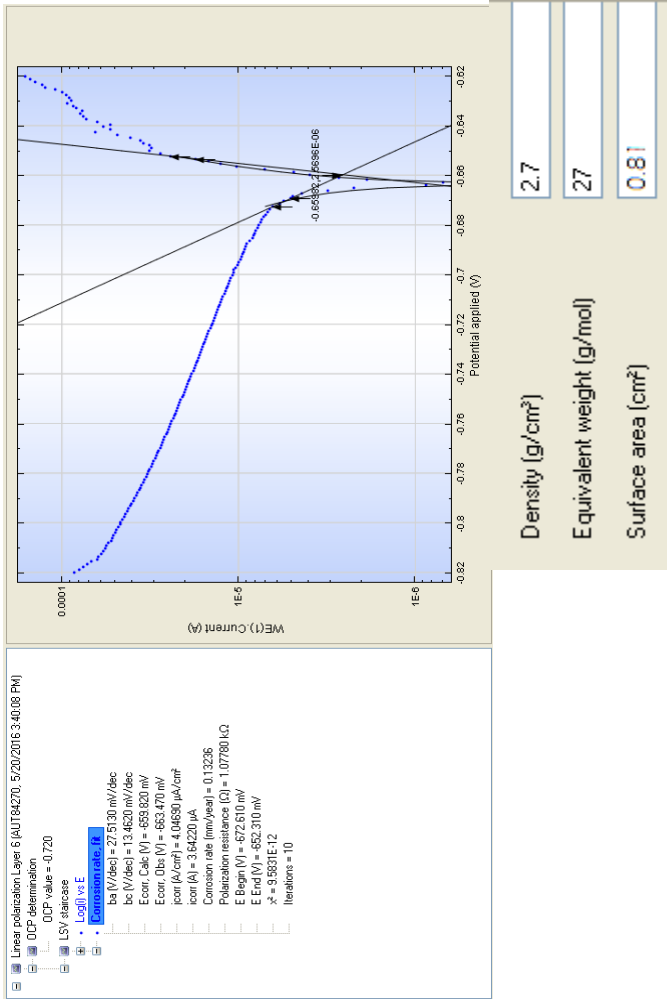


Density (g/cm³)	7.85
Equivalent weight (g/mol)	27.925
Surface area (cm²)	1



Hasil Analisa Polarisasi Linier – Potensiostat Autolab (PGSTAT302N)

Nama Sample : API 5L Grade B Layer 6
Larutan elektrolit : NaCl 3,5%

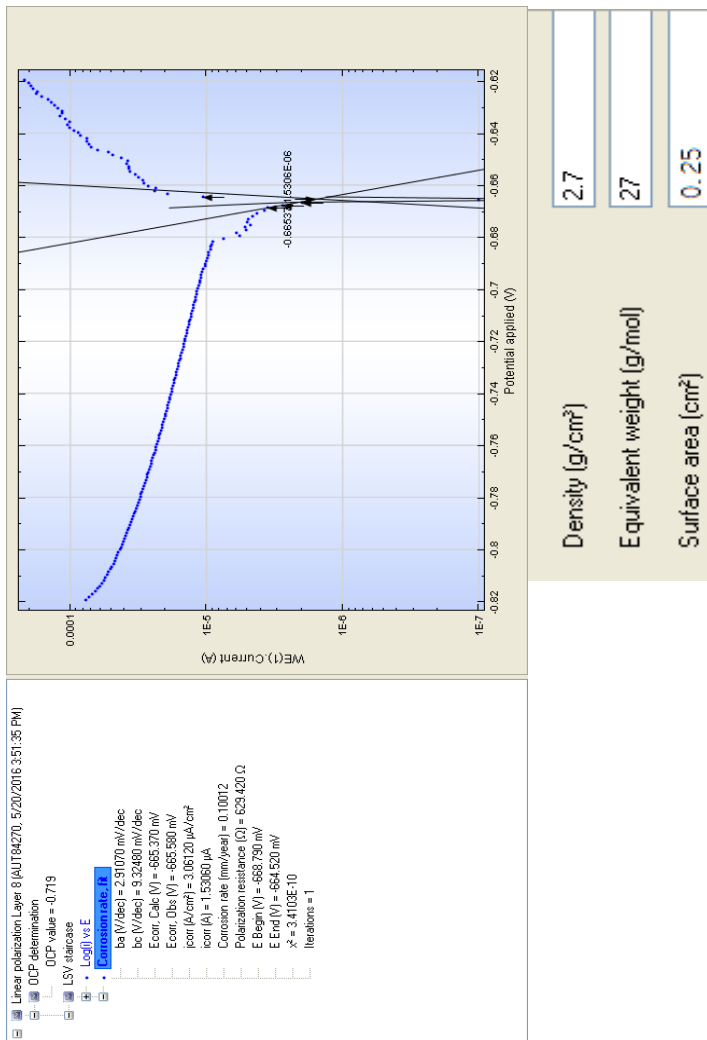




Hasil Analisa Polarisasi Linier – Potensiostat Autolab (PGSTAT302N)

Nama Sample : API 5L Grade B Layer 8

Larutan elektrolit : NaCl 3,5%



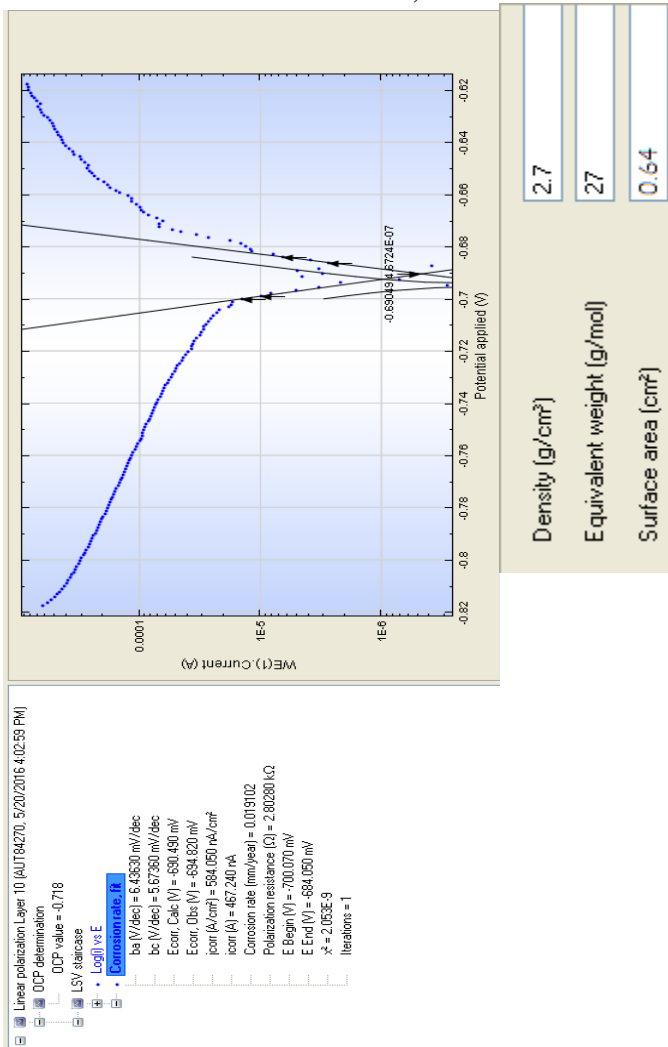
Lampiran



Hasil Analisa Polarisasi Linier – Potensiostat Autolab (PGSTAT302N)

Nama Sample : API 5L Grade B Layer 10

Larutan elektrolit : NaCl 3,5%





2. Sertifikat Analisa Pengujian Laju Aus

BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR

REPORT
Certificate of Analysis

No : 06106/KI/VI-2016
Code : Penelitian
Sample Sender : Pns. T. Potesial
Sample Name : Baja Aluminium
Test : Laju aus
Sample Brand :
Sample Identity : Padatan cetak putih keas
Sample Accepted : 22 Juni 2016

Chemical laboratory test result is:

Kode	Laju Aus, mg/cm ² /jam
1	4,49
2	4,62
3	5,04
6	5,21
8	5,45
10	5,71

Surabaya, 27 Juni 2016
Head of Chemical Laboratory Researcher
Drs. M. Fatoni, M.S.

Laboratory Office Jl. Ketintang Baru XVII no 14
Telp 08155151337, Bank BCA – Bank Jatim
Surabaya



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa data dapat disimpulkan bahwa :

1. Nilai ketebalan tertinggi didapat pada variabel jumlah *layer* 10, dengan tebal rata-rata mencapai 1323,67 μm . Semakin banyak jumlah *layer*, maka semakin tebal lapisan *coating* yang terbentuk. Hal ini disebabkan karena semakin banyak *layer* yang diaplikasikan, maka semakin banyak pula logam *coating* yang terdeposisi di permukaan substrat.
2. Nilai daya lekat paling tinggi didapat pada variabel jumlah *layer* 6 dengan nilai rata-rata daya lekat 38,82 MPa. Semakin banyak jumlah *layer*, maka daya lekat *coating* semakin menurun, dikarenakan ikatan yang terjadi di pertengahan *coating* lebih lemah dibandingkan ikatan mekanik antara permukaan substrat dan *coating*.
3. Nilai laju korosi paling rendah didapatkan pada variabel jumlah *layer* 10 dengan nilai sebesar 0,019102 mm/year. Semakin banyak jumlah *layer*, maka ketahanan korosi semakin meningkat dikarenakan semakin banyak jumlah *layer* atau lapisan *coating*, maka substrat juga semakin terlindung dengan keberadaan *coating* yang semakin tebal, sehingga umur baja juga semakin panjang.
4. Nilai laju aus paling rendah terdapat pada variabel jumlah *layer* 6 dengan nilai 5,21 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{jam}$. Semakin banyak jumlah *layer*, maka ketahanan ausnya semakin turun dikarenakan oleh semakin banyak jumlah lapisan yang diaplikasikan saat proses pelapisan, maka daya lekat *coating* terhadap substrat pun juga semakin turun yang



menimbulkan efek domino berupa menurunnya ketahanan aus pada *coating*.

5. Variabel jumlah *layer* 6 adalah variabel yang paling efektif untuk diaplikasikan di dunia industri karena menyediakan proteksi yang cukup baik untuk mencegah terjadinya korosi dan memiliki ketahanan aus yang paling baik.

5.2 Saran

Disarankan dalam pelaksanaan penelitian berikutnya agar:

1. Parameter kecepatan pelapisan agar lebih diperhatikan untuk mendapatkan ketebalan per layer yang lebih konstan.
2. Pemakaian arus yang lebih stabil agar tingkat peleburan aluminium dapat lebih konstan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cochran, J.F., dan Mapother, D.E. 1958. **Superconducting Transition in Aluminum**. Illinois: University of Illinois
- Dieter, G. E. 1988. **Mechanical Metallurgy**. New York: McGraw-Hill
- Dorfman, M.R. 2005. **Thermal Spray Coating in Handbook of Environmental Degradation of Materials**. Diedit oleh K. Myer. Norwich: William Andrew Publishing
- Fischer, K.P. 1995. "Performance History of Thermal-Sprayed Aluminum Coatings in Offshore Service". **Material Performance**, 34 (4): 27-35
- Gomes, E.C. 2010. "Corrosion Protection by Multilayer Coating Using Layer-by-Layer Technique". **Surface & Coatings Technology**, 2857-2864. Brazil: ITA
- Hup, Ong Chong. 2010. **Norimax: Corrosion Control Materials and Consultancy Services in Thermal Spray Coating**. Selangor: Norimax Sdn Bhd
- Jones, Denny A. 1992. **Principles and Prevention of Corrosion**. NJ, USA: Prentice Hall Inc.
- Khun, N.W. (2013). "Effects of carbon nanotube content on adhesion strength and wear and corrosion resistance of epoxy composite coatings on AA2024-T3". **Progress in Organic Coatings**. Columbus: The Ohio State University.
- Larasati, Fitrianova. 2013. "Pengaruh Jarak Nozzle dan Tekanan Gas pada Proses Pelapisan Ni-20Cr dengan Metode Wire Arc Spray Terhadap Ketahanan Thermal". **Jurnal Teknik POMITS Vol. 1/No. 2**. Surabaya: ITS
- Macanás, J., dkk. 2011. **Hydrogen Generation by Aluminum Corrosion in Aqueous Alkaline Solutions of Inorganic Promoters: The AlHidrox Process**. Oxford, England: Elsevier Limited



-
- Nisancioglu, K. 1994. **Corrosion Basics and Engineering - Lecture Notes for the Course 535233 Korrosjonslaere**. Trondheim: Norges Tekniske Hogskole, Institutt for Teknisk Elektrokjemi
- Nisancioglu, K. 2007. "Corrosion and Protection of Aluminum Alloys in Seawater". **European Federation of Corrosion Publication**, 50: 145
- Polmear, I.J. 1995. **Light alloys: Metallurgy of the Light Metals 3rd Edition**. Boston: Butterworth-Heinemann
- Pawlowski, L. 2008. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings edisi kedua**. London: John Wiley & Sons Ltd.
- Rafferty, Kevin. 1989. **Geothermal District Piping-A Primer**. Klamath Falls, Oregon : Geo Heat Center
- Sastrakencana, F. 2008. **Kajian Pendahuluan Pembuatan Paduan Fe-Ni-Al**. Bandung: ITB
- Schoop, M.U., dan Guenther, H. 1917. **Das Schoopsche Metallspritz-Verfahren**. Stuttgart: Franckh-Verlag
- Shakhashiri, B.Z. 2008. **Chemical of the Week: Aluminum**. Wisconsin: University of Wisconsin
- Siegmund, A.J. 1997. **Metal Alloy; Corrosion Protection for the Future in NACE International Annual Conference and Exposition**. Houston: NACE
- Tjong, S. C. 1986. **Werkst. Korros.** 37 591
- Setiawan, Sugiono. 2013. "Pengaruh Variasi Sudut Nozzle dan Jarak Nozzle pada Arc Spray Coating Terhadap Ketahanan Abrasif Lapisan 13% Chrome Steel". **Jurnal Teknik POMITS Vol. 2/No. 1**. Surabaya: ITS
- Zhang, Ping dkk. 2016. "Preparation and characterization of $\text{MoS}_2\text{-Ti}_L/\text{MoS}_2\text{-Ti}_H$ nano multilayer coating with excellent wear properties". **Material Letters**, 173: 35-38. China: Taizhou University
-

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Rangga Al Gifary Imanullah. Dilahirkan di kota Banjarmasin, Kalimantan Selatan, pada tanggal 31 Agustus 1994. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri 017 Sangatta Utara, SMP Negeri 1 Banjarbaru, dan SMA Negeri 1 Banjarbaru. Lulus Sekolah Menengah Atas pada tahun 2012, penulis melanjutkan pendidikan Perguruan Tinggi di Jurusan Teknik Material dan

Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS sebagai staf Departemen Hubungan Luar (2013-2014) dan staf ahli Departemen Hubungan Luar (2014-2015). Selain aktif di berkegiatan di HMMT, penulis juga turut aktif berpartisipasi di komunitas pecinta lingkungan Earth Hour Surabaya (2013-2016). Semasa kuliah, penulis juga melakukan kegiatan Kerja Praktik di PT. Steadfast Marine Engineering di Pontianak, Kalimantan Barat. Dan kegiatan perkuliahannya diakhiri dengan melakukan penelitian yang dijadikan Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Jumlah Lapisan pada Proses Pelapisan Aluminium dengan Metode *Wire Arc Spray* terhadap Ketahanan Korosi dan Ketahanan Aus pada Substrat Baja API 5L Grade B”.

e-mail: ralgifary@gmail.com